

RESUMO

A monitorização e a caracterização ambiental de depósitos de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são uma área crescente, em termos dos estudos interdisciplinares envolvidos. Qualquer que seja a solução adoptada para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, o seu confinamento final em aterro não é o fim do problema. Ao contrário, a necessidade de monitorização contínua, acompanhando a evolução da massa de resíduos em toda a sua envolvente, contribuirá para avaliar as consequências ambientais da existência de um depósito de RSU.

A avaliação da dispersão de contaminantes em Vazadouros Controlados (VC) de RSU é possível através da combinação de estudos geológicos, geofísicos, geoquímicos e estatísticos, conforme se poderá verificar pelo que será descrito nesta tese. A metodologia aplicada neste estudo irá contribuir para avaliar as consequências ambientais do VC de Matosinhos (Norte de Portugal), que se insere num contexto geológico cristalino granítico com uma permeabilidade controlada por alteração diferencial associada a fracturação.

O VC de Matosinhos, o objecto de estudo desta tese, possui uma característica especial pois é constituído por duas zonas distintas: uma correspondente à antiga lixeira (sem impermeabilização na base) e outra correspondente ao Aterro Sanitário (com três alvéolos devidamente impermeabilizados). O principal problema deste local é a área correspondente à antiga lixeira, na qual, ao longo de quase 20 anos, diversos tipos de resíduos foram depositados de forma descontrolada.

Com vista à identificação da pluma de contaminação proveniente do VC de Matosinhos foram utilizados diferentes métodos geofísicos: método da resistividade eléctrica, método electromagnético, método da refacção sísmica e MASW. Para validação dos resultados obtidos através desses métodos recorreu-se a estudos geológicos, análises físico-químicas de águas e métodos estatísticos.

A característica inovadora desta tese está relacionada com a aplicação de métodos estatísticos, vulgarmente utilizados na análise de dados geoquímicos, a dados geofísicos, com o intuito de, efectivamente, distinguir entre aquilo que são valores

geofísicos anómalos e aquilo que corresponde a valores geofísicos de fundo do local em estudo. O estabelecimento de valores limite entre anomalia geofísica e background geofísico para um determinado local é algo que ainda não foi efectuado na área da geofísica ambiental.

Foi elaborado um modelo hidrogeológico da área de estudo com base na informação geológica recolhida na fase de reconhecimento do local de estudo, posteriormente complementada com dados de sondagens e com resultados obtidos pelos métodos de refacção sísmica e MASW.

Os dados de resistividade eléctrica foram obtidos através da realização de 32 perfis com o arranjo Wenner-Schlumberger, por este ser uma boa alternativa entre a configuração Wenner e a configuração Dipolo-Dipolo, permitindo obter uma maior profundidade de investigação do que o Wenner, com uma força de sinal maior do que o Dipolo-Dipolo.

Verificou-se uma concordância, em termos de resultados obtidos pelos diferentes métodos geofísicos (resistividade eléctrica, electromagnética e sísmica), na definição e delimitação da pluma de contaminação proveniente do VC.

Os métodos estatísticos aqui descritos (*Iterative 2 σ* e *Calculated distribution function*) foram adaptados para serem usados com o conjunto de perfis 2D de resistividade obtido, de modo a relacioná-los no espaço tridimensional e, portanto, delinear as anomalias de contaminação na envolvente ao VC.

Foram recolhidas amostras de águas subterrâneas, a montante e a jusante do VC, com o objectivo de confirmar directamente a presença de contaminantes indirectamente detectados pelos métodos geofísicos e estatísticos.

A combinação destas diferentes abordagens foi englobada num programa de visualização a 3D (*GeoMerge*), permitindo delimitar as plumas de contaminação provenientes do VC a várias profundidades e calcular o seu volume global.

Palavras-Chave: Resistividade eléctrica, pluma de contaminação, Vazadouro Controlado, métodos estatísticos, visualização 3D.

ABSTRACT

The characterization and environmental monitoring of Municipal Solid Waste (MSW) deposits are an increasing area, in terms of the interdisciplinary studies involved. Whatever the solution adopted for the MSW treatment, its final containment on landfill is not the end of the problem. Rather, the need for continuous monitoring, tracking the evolution of the waste mass in all its surroundings, will contribute to evaluate the environmental consequences of the existence of a deposit of MSW.

The assessment of contaminants dispersion in Controlled Dumps (CD) of MSW is possible through the combination of geological, geophysical, geochemical and statistical studies as described in this thesis. The methodology applied in this study will contribute to evaluate the environmental consequences of the Matosinhos CD (north Portugal), which is set in a granitic crystalline geological context with a permeability controlled by differential weathering associated with fracturing.

The Matosinhos CD, the study object of this thesis, has a special feature consisting of two distinct zones: one corresponding to the old dump (without sealing in the base) and another corresponding to the Landfill (with three cells properly sealed). The main problem is the area corresponding to the old dump, in which over almost 20 years, several types of waste were deposited in an uncontrolled way.

In order to identify the contamination plume from the Matosinhos VC, different geophysical methods were used: electrical resistivity, electromagnetic, seismic refraction and MASW. To validate the results obtained through these methods, geological studies, physicochemical water analysis and statistical methods were used.

The innovative feature of this thesis is related to the application of statistical methods, commonly applied in geochemical data, to geophysical data, in order to distinguish between geophysical anomalous values and geophysical background values of the study area. Setting a limit between geophysical anomaly and geophysical background in a particular location is something that has not been done in the environmental geophysics area.

A hydrogeological model of the study area was prepared based on geological information collected during the site recognition stage, later complemented with data from geological soundings and results from seismic refraction and MASW methods.

The electrical resistivity data were obtained by conducting 32 profiles with the Wenner-Schlumberger array, which is a good alternative to Wenner and Dipole-Dipole configuration, allowing a greater depth of investigation than Wenner, with greater signal strength than Dipole-Dipole.

Statistical methods here described (*Iterative 2σ* and *Calculated distribution function*) were adapted to be used with the set of 2D resistivity profiles in order to relate them and thus delineate the contamination plume in the CD surroundings in three dimensional space.

There was a good correlation between results obtained by different geophysical methods (electrical resistivity, electromagnetic and seismic) in the definition and delineation of the contamination plume from the CD.

Groundwater samples were collected, upstream and downstream of the CD, with the aim of directly confirming the presence of contaminants indirectly detected by geophysical and statistical methods.

The combination of these different approaches was enclosed in a 3D visualization program (*GeoMerge*), allowing to delimit contamination plumes from the CD at several depths and to calculate its overall volume.

Key words: Electrical resistivity, contamination plume, Controlled Dump, statistical methods, 3D visualization.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, porque existem professores que nos marcam ao longo do nosso percurso académico, gostaria de deixar o meu agradecimento a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a minha formação e para o alcançar de um objectivo profissional que muito me orgulha. Em especial gostaria de destacar a Prof Maria dos Anjos Ribeiro, por ter sido sempre uma inspiração para mim, pela sua dedicação à profissão e aos alunos e pela paixão pela geologia que sempre me transmitiu, que me continua a fazer vê-la com um modelo a seguir.

Ao meu orientador Doutor Rui Miguel Marques Moura e ao meu co-orientador Doutor António Guerner Dias por me darem a oportunidade para criar e desenvolver este projecto, por acreditarem nas minhas capacidades e por me permitirem ser autónoma, condições necessárias para desenvolver um projecto desta natureza. Pelas palavras de apoio, que não esqueço, em momentos menos bons que tive de ultrapassar, muito obrigada.

Ao Professor Doutor Fernando Noronha, ao Professor Doutor Manuel João Senos Matias e ao Doutor Jorge Espinha Marques, pelas sugestões e comentários construtivos que me permitiram melhorar o meu trabalho e evoluir como investigadora, e acima de tudo pela disponibilidade que demonstraram em me ajudar.

Ao Centro de Geologia da Universidade do Porto e ao seu presidente, Professor Doutor Fernando Noronha, ao Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e à sua presidente Professora Doutora Deolinda Flores, pelo bom acolhimento e pela cedência das condições necessárias à elaboração deste trabalho.

Aos membros do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, investigadores, docentes e funcionários, que de alguma forma contribuíram para o meu bem-estar no local de trabalho.

Às entidades externas, LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto, CCDR-N - Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, SUMA – Serviços Urbanos e Meio Ambiente, SA e Câmara Municipal de Matosinhos por permitirem o acesso para realização de trabalho de campo no Vazadouro Controlado de Matosinhos e pelas informações cedidas sobre o mesmo.

Ao Vítor Gonçalves e seus orientadores, pela parceria na elaboração do programa informático de visualização a 3D.

À Sofia Rios, ao Sérgio Ribeiro, ao Fábio Lino e ao Daniel Teixeira pela ajuda voluntária no trabalho de campo, sem pretenderem nada em troca, coisa rara hoje em dia.

Aos colegas e aos amigos de longa data pela companhia, apoio, incentivo e solidariedade e sobretudo pelas palavras de incentivo que me foram dizendo, que tenho guardado cá dentro.

Aos meus avós, António e Alice, pelo exemplo de vida que sempre foram para mim e por saber que estejam onde estiverem estão orgulhosos de mim.

À minha mãe, a quem devo a vida, por estar sempre presente, pelo sacrifício que fez para eu poder fazer a minha licenciatura, sem a qual não estaria aqui e acima de tudo pelo apoio e amor incondicional.

Ao meu marido, por me incentivar a iniciar este projecto, por me fazer acreditar que conseguia, por me mostrar as minhas capacidades quando por vezes não as via, por tantas horas dedicadas a ajudar-me neste trabalho e sobretudo pelo seu amor, obrigada.

Ao meu filho, que nascerá em breve, que me acompanhou desde o seu primeiro dia, nos momentos de maior ansiedade durante a fase de escrita da tese, pela felicidade que me trouxe com a sua presença, obrigada.

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	3
AGRADECIMENTOS	5
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS	15

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1. Objectivos e Metodologia	18
I.2. Estado da Arte	19

CAPÍTULO II - ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

II.1. Enquadramento Geográfico e Geomorfológico	26
II.2. Enquadramento Geológico	28
II.2.1. Geologia Regional	28
II.2.2. Cartografia à Escala 1/10 000	31
II.2.3. Sondagens Mecânicas	35
II.2.4. Petrografia	36
II.3. Enquadramento Ambiental	38
II.3.1. Águas e Solo	39
II.3.2. Ar e Ruído	42
II.4. O Vazadouro Controlado de Matosinhos	44
II.4.1. Enquadramento Legal	44
II.4.2. Caracterização Geral	46

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

III.1. Prospekção Geofísica	53
III.1.1. Selecção dos Métodos Geofísicos	55
III.1.2. Método Electromagnético Indutivo	58
III.1.2.1. Princípios Fundamentais	58
III.1.2.2. Aquisição de Dados	62
III.1.3. Método da Resistividade Eléctrica	65
III.1.3.1. Princípios Fundamentais	65
III.1.3.2. Aquisição de Dados	71

III.1.4. Métodos Sísmicos	75
III.1.4.1. Princípios Fundamentais	75
III.1.4.2. Aquisição de Dados	81
III.2. Análises de Águas Subterrâneas e Superficiais	83
III.3. Abordagem Estatística aos Dados de Resistividade Eléctrica	93

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1. Tratamento de Dados e Apresentação de Resultados	99
IV.1.1. Método Electromagnético Indutivo	99
IV.1.2. Método da Resistividade Eléctrica	102
IV.1.3. Método da Refracção Sísmica e MASW	114
IV.1.4. Análises de Águas Subterrâneas e Superficiais	120
IV.1.5. Abordagem Estatística aos Dados de Resistividade Eléctrica	131
IV.2. Integração Conjunta dos Resultados	136
IV.2.1. Modelo Hidrogeológico Conceptual	136
IV.2.2. Visualização a 3D	139
IV.2.2.1. Interpolação e Incerteza	140
IV.2.2.2. Visualização da Anomalia	142

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

V.1. Considerações Finais	151
V.2. Trabalhos Futuros	155

CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
---	------------

LISTA DE TABELAS

Tabela I.1 – Síntese de trabalhos recentes relacionados com a aplicação de métodos de prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação provenientes de aterros	22
Tabela I.2 – Síntese de trabalhos recentes relacionados com a aplicação de métodos de prospecção geofísica ao estudo de aterros/lixeiros	23
Tabela III.1 – Exemplos da proveniência de determinados iões presentes nos lixiviados/águas subterrâneas (adaptado de Segato & Silva, 2000)	88
Tabela III.2 – Resultados de análises físico-químicas de lixiviados produzidos nos novos alvéolos do VC de Matosinhos (adaptado de Russo, 2005) e intervalos de resultados obtidos em aterros com menos de 2 anos e com mais de 10 anos (Tchobanoglous et al., 1993)	89
Tabela III.3 – Resultados de análises de água subterrânea obtidos nos piezómetros a montante e a jusante do VC de Matosinhos (adaptado de Russo, 2005)	90
Tabela IV.1 – Valores de pH, concentração de cloretos e condutividade eléctrica obtidos nos 4 grupos de águas	120
Tabela IV.2 – Resultados de valores de resistividade anómalos e de background obtidos pelos métodos Iterative 2 σ e Calculated distribution function, para 13 distribuições com diferentes profundidades	132

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 – Localização Geográfica do VC de Matosinhos. Adaptado Carta Militar de Portugal - folha nº110 (IGeoE, 1998) e Google Earth (2007)	26
Figura II.2 – Hipsometria e rede hidrográfica da região do Porto (adaptado de Coxito Afonso, 2003)	27
Figura II.3 – Zonamento do Maciço Ibérico: à esquerda, síntese de vários autores in Chaminé (2000); à direita, adaptado de Ribeiro et al (2007) in Dias & Ribeiro 2010	28
Figura II.4 – Enquadramento Geológico do VC de Matosinhos adaptado de Folha 9-C, à escala 1/50 000 (Carrington da Costa & Teixeira, 1957) e de Folha 1 à escala 1/200 000 (Pereira, 1989)	32
Figura II.5 – Cartografia à escala 1/10 000 da envolvente do VC de Matosinhos	33
Figura II.6 – Envolvente granítica do VC de Matosinhos: a – barreira com granito muito alterado, junto à linha de metro; b - afloramento de granito pouco alterado, em #1; c – pormenor do granito, em #1; d – filonete pegmatítico com cristais de turmalina, em #2; e, f - pormenores da fracturação e alteração do granito medianamente alterado e fracturado, em #2	34
Figura II.7 – Perfil tipo obtido com a realização de sondagens mecânicas, no local designado por “S” na figura II.5.	35
Figura II.8 – Minerais observados em lâmina delgada (a – moscovite e plagioclase, em nicóis cruzados; b – feldspato potássico em nicóis cruzados; c – biotite com inclusões de zircão em nicóis paralelos; d – moscovite e plagioclase, em nicóis paralelos; e – clorite em nicóis paralelos).	37
Figura II.9 – a - plagioclase e quartzo em nicóis cruzados; b, c - inclusões fluidas no quartzo.	37
Figura II.10 – Potenciais focos de poluição na envolvente da área de estudo: VC, Rio Leça, Lipor II, tráfego rodoviário (ex.: A41 e VRI), aeroporto e dispersas pela área de estudo as actividades doméstica, industrial e agrícola).	38
Figura II.11 – Duas áreas distintas no Vazadouro Controlado de Matosinhos: a branco - 3 alvéolos devidamente impermeabilizados; a preto - zona sem impermeabilização da base correspondente à antiga lixeira do município.	47
Figura II.12 – Imagens actuais do VC de Matosinhos, após o encerramento e recuperação paisagística (A – zona sem impermeabilização da base; B - zona devidamente impermeabilizada.	50
Figura III.1 – Ilustração do princípio de funcionamento do método electromagnético (Tx: bobine transmissora; Rx: bobine receptora; Hp: campo magnético primário; Hs: campo magnético secundário; Ce – correntes eléctricas induzidas) (adaptado de NGA, 2011).	60
Figura III.2 – Arranjos entre as bobines, no método electromagnético: a – dipolo vertical, bobine horizontal; b – dipolo horizontal, bobine vertical (McNeill, 1980b).	61

Figura III.3 – Método EM: a – EM-31; b - FDEM-8, transmissor; c - FDEM-8, receptor; d- localização dos perfis realizados.	63
Figura III.4 – Levantamento de obstáculos metálicos existentes na área de estudo.	64
Figura III.5 – Fluxo de corrente eléctrica no terreno (I – intensidade de corrente eléctrica injectada no terreno; r – raio da semiesfera considerada).	65
Figura III.6 – Modelo Esquemático do método da resistividade eléctrica (adaptado de Knodel et al., 2007).	66
Figura III.7 – Diferentes configurações de eléctrodos utilizadas no método da resistividade eléctrica.	67
Figura III.8 – Construção de uma pseudo-secção de resistividade com o dispositivo Wenner-Schlumberger (Adaptado de Neymadpour, 2010).	68
Figura III.9 – Valores típicos de resistividade em materiais geológicos (Segundo Keller e Frischknecht 1966, Daniels and Alberty 1966, Telford et al. 1990 adaptado de Loke, 2013).	69
Figura III.10 – Secções de resistividade obtidas com os arranjos Dipolo-Dipolo (a) Wenner (b) e Wenner-Schlumberger (c).	71
Figura III.11 – Método RE: a – equipamento Syscal Júnior Switch 48; b – instalação do equipamento para realização de um perfil de RE; c - localização dos perfis de realizados.	73
Figura III.12 – Definição das características de aquisição dos dados de resistividade eléctrica.	74
Figura III.13 – Sequência Wenner-Schlumberger utilizada para a obtenção dos dados de resistividade, com a esquematização das leituras efectuadas (366 no total).	74
Figura III.14 – Movimento das partículas (a vermelho) associado à propagação das ondas sísmicas volúmicas (P, S) e superficiais (R, L) e respectiva deformação elástica (adaptado de Lowrie, 2007).	76
Figura III.15 – Gamas de velocidades de ondas P e escarificabilidade em materiais geológicos usando ripper D-9 (adaptado de Caterpillar Tractor Company, 1982).	77
Figura III.16 – Esquema representativo do trajecto de ondas sísmicas num modelo de 3 camadas com velocidades (V1, V2 e V3) e densidades (ρ_1 , ρ_2 e ρ_3). Verde: onda directa, vermelho: ondas reflectidas; azul: ondas refractadas criticamente (adaptado de BURVAL, 2006).	79
Figura III.17 – Métodos Sísmicos: a – localização dos perfis realizados; b – aquisição de dados sísmicos (S1); c, d – equipamento utilizado para realização dos perfis sísmicos: geofones, cabo eléctrico, sísmógrafo e PC.	81
Figura III.18 – Esquema da aquisição de dados sísmicos: a) sísmica de refração; b) MASW.	82
Figura III.19 – Localização dos pontos de amostragem de águas na área de estudo.	84
Figura III.20 - Composição dos resíduos depositados no VC de Matosinhos entre 1993-	87

2003 (adaptado de Russo, 2005).

Figura III.21 - Composição qualitativa média dos RSU recebidos no VC de Matosinhos durante o período 2000-2002 (adaptado de Russo, 2005). 87

Figura III.22 – Ilustração da curva de Gauss, baseada na média (\bar{x}) e desvio padrão (σ) de uma distribuição normal. 92

Figura III.23 – Ilustração do método de Lepeltier. A seta aponta para o ponto de viragem entre os dois conjuntos de dados (adaptado de Matschullat et al., 2000). 94

Figura IV.1 – Pseudo-secção de condutividade do perfil EMt. O círculo vermelho indica uma zona menos condutiva, provavelmente associada à presença de um pequeno bloco granítico alterado. 99

Figura IV.2 – Secção de resistividade relativa ao perfil 12, realizado segundo o método da resistividade eléctrica. O círculo vermelho indica uma zona mais resistiva relacionada com o círculo da figura IV.1. 100

Figura IV.3 – Pseudo-secções dos perfis EM1, EM2, EM3, EM4 e EM5 (esquerda); Localização de todos os perfis realizados com o método EM (direita). 100

Figura IV.4 – Secção de resistividade relativa ao perfil 7, realizado segundo o método RE. 101

Figura IV.5 - Modelação dos dados de resistividade do perfil 1 usando o programa RES2DINV: a – pseudo-secção de resistividade aparente medida; b – pseudo-secção de resistividade calculada; c – secção de resistividade (modelo final). 103

Figura IV.6 – Opção exterminate bad datum points do programa RES2DINV: o círculo assinala um dado errático que pode ser removido através desta opção. 104

Figura IV.7 – Esboço preliminar das plumas de contaminação na área de estudo, para uma profundidade média de 5m. 106

Figura IV.8 – Esquema representativo das secções de resistividade obtidas na área de estudo, relativas aos perfis de RE localizados na Fig. IV.7. 107

Figura IV.9 – Secções de resistividade relativas aos perfis 12 (mais próximo do VC), 10 e 19 (mais afastado do VC), que mostram a pluma de contaminação a Norte e a sua atenuação à medida que aumenta o afastamento ao VC. 108

Figura IV.10 – Perfis de resistividade 3, 4 e 5 que mostram a pluma de contaminação a Sul e a sua atenuação à medida que aumenta o afastamento ao VC. 109

Figura IV.11 – Secção de resistividade relativa ao perfil 25, realizado segundo o método RE. 109

Figura IV.12 – Secção de resistividade relativa ao Perfil 29. Identificação do limite entre zona impermeabilizada e zona não impermeabilizada no VC de Matosinhos, alvéolos onde se depositaram resíduos e anomalia de resistividade. 110

Figura IV.13 – Secções de resistividade relativas aos perfis 8 e 21, realizados respectivamente em março de 2010 e março de 2011. Secções de resistividade relativas aos perfis 2 e 11, realizados respectivamente em fevereiro de 2010 e outubro 112

de 2010.

Figura IV.14 - Comparação das secções de resistividade relativas aos perfis 8 e 21, e aos perfis 2 e 11, com a opção de inversão Time-Lapse do RES2DINV. 113

Figura IV.15 – Representação gráfica da variação da precipitação (1) e temperaturas máximas e mínimas (2) na estação climatológica de Porto - Pedras Rubras, com base nos relatórios climatológicos de agosto de 2009 a março de 2011, do instituto de meteorologia (<http://www.meteo.pt/>). As setas com os números 2, 8, 11 e 21 representam a data em que foram realizados os perfis de resistividade 2, 8, 11 e 21 respectivamente. 114

Figura IV.16 – Tomografias sísmicas obtidas pela inversão de dados obtidos pelo método da refacção sísmica, S1 a norte do VC e S2 a sul do VC. Sondagem mecânica (ST1B) a sul do VC 116

Figura IV.17 – Tomografias de refacção sísmica versus Secções de resistividade eléctrica: a) secção 1 de RE e tomografia sísmica S1; b) secção 4 de RE e tomografia sísmica S2. 117

Figura IV.18 – Espectro de velocidade de fase em função da frequência e curva de dispersão para S1M (esquerda). Modelo de distribuição de velocidade de propagação de ondas S em profundidade gerado para S1M (direita). 119

Figura IV.19 – Espectro de velocidade de fase em função da frequência e curva de dispersão para S2M (esquerda). Modelo de distribuição de velocidade de propagação de ondas S em profundidade gerado para S2M (direita). 119

Figura IV.20 – Sentido do fluxo subterrâneo (setas azuis) e localização dos pontos de amostragem de águas na área de estudo. 121

Figura IV.21 – Comparação de resultados de condutividade eléctrica na água subterrânea referente a um piezómetro a montante (Pz4) e outro a jusante do VC (Piezómetro3). 123

Figura IV.22 – Resultados de condutividade eléctrica obtidos na água subterrânea vs resultados de resistividade eléctrica (2010): a) Piezómetro1 e secção de resistividade do perfil1; b) Piezómetro3 e secção de resistividade do perfil3. 124

Figura IV.23 – Resultados de condutividade eléctrica obtidos na água subterrânea vs resultados de resistividade eléctrica (2011-2012): a) Pz4 e secção de resistividade do perfil7; b) Pz3 e secção de resistividade do perfil2. 126

Figura IV.24 – Resultados de condutividade eléctrica obtidos na água subterrânea dos Piezómetros 1, 2 e 3. 126

Figura IV.25 – Diagramas de Stiff para as águas subterrâneas do Grupo 2. 128

Figura IV.26 – Diagramas de Stiff para águas subterrâneas do Grupo 4. 129

Figura IV.27 – Diagramas de Stiff para águas subterrâneas do Grupo 3. 129

Figura IV.28 – Ilustração dos passos descritos no texto, para o perfil 12 com o método Iterative 2σ: 1 – modelo de resistividade (RES2DINV); 2 – filtro booleano; 3 – modelo de 133

resistividade e filtro booleano sobrepostos.

Figura IV.29 – Ilustração da anomalia interpretada na secção de RE do perfil 12, para resistividade $<30\Omega.m$. 133

Figura IV.30 – Ilustração da anomalia interpretada com o método Calculated distribution function, para a secção de RE do perfil 12. 134

Figura IV.31 – Gráficos de distribuição da resistividade eléctrica: a) histograma da população; b) curva de frequências relativas acumuladas (seta indica o limite anomalia/background); c) histograma e curva de frequências relativas log-normal. 135

Figura IV.32 – Esquema do modelo hidrogeológico da área de estudo: a) localização do perfil NW-SE, na carta militar 110 à escala 1/25000 (IGeoE, 1998); b) modelo hidrogeológico a 2D, com inclusão dos limites do vazadouro controlado e das zonas impermeabilizada e não impermeabilizada do mesmo. 137

Figura IV.33 – Exemplo da representação da incerteza no cálculo do volume no programa *GeoMerge*: a) maior incerteza; b) menor incerteza. 141

Figura IV.34 – Exemplo da representação da secção do perfil 12 no programa *GeoMerge*: a) sem representação da anomalia; b) com representação da anomalia (preto), pelo método Calculated distribution function; c) com representação da anomalia (preto), pelo método Iterative 2σ . 142

Figura IV.35 – Representação das secções dos perfis 1 a 32 no espaço 3D, com representação da anomalia (preto), para o método Calculated distribution function, sob a superfície do terreno (representada por uma imagem georreferenciada). 143

Figura IV.36 – Representação das secções dos perfis 1 a 32 no espaço 3D, com representação da anomalia (preto), para o método Iterative 2σ , sob a superfície do terreno (representada por uma imagem georreferenciada). 144

Figura IV.37 – Representação do volume da anomalia: a) para o método Calculated distribution function; b) para o método Iterative 2σ . 145

Figura IV.38 – Representação da anomalia por profundidades. Com o método Calculated distribution function: 1 - 0-1m, 2- 5m, 3 - 10m, 4 - 15m. Com o método Iterative 2σ : 5 - 0-1m, 6- 5m, 7 - 10m, 8 - 15m. 146

Figura IV.39 – Representação da resistividade nas análises de água relativas a maio de 2011, com a anomalia de resistividade definida pelo método Calculated distribution function: cilindros vermelhos – com contaminação; cilindros amarelos – sem contaminação. 148

Figura IV.40 – Representação da resistividade nas análises de água relativas a abril de 2012, com a anomalia de resistividade definida pelo método Calculated distribution function: cilindros vermelhos – com contaminação; cilindros amarelos – sem contaminação. 148

LISTA DE ABREVIATURAS

AMP - Área Metropolitana do Porto

AS - Aterro Sanitário

CXG - Complexo Xisto-Grauváquico

EM – Electromagnético indutivo

ETL - Estação de Tratamento de Lixiviados

FCPT - Faixa de Cisalhamento Porto-Tomar

FDEM - *Frequency Domain Electromagnetic*

GPR – Georadar (*ground-penetrating radar*)

IP – Polarização induzida (*induced polarization*)

IPAC - Instituto Português de Acreditação

ISRM - *International Society for Rock Mechanics*

MASW - *Multichannel Analysis of Surface Waves*

MI - Maciço Ibérico

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PERSU - Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

RE – Resistividade eléctrica

REA - Relatório do Estado Ambiente

RIB - Resíduos Industriais Banais

RMS - *Root Mean Square*

RMT – Rádio magneto telúrica

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SI - Sistema Internacional

SP – Potencial espontâneo (*self potencial*)

SR – Refracção sísmica (*seismic refraction*)

STD - Sólidos Totais Dissolvidos

SUMA - Serviços Urbanos e Meio Ambiente

VC – Vazadouro Controlado

VMA - Valores Máximos Admissíveis

VMR - Valores Máximos Recomendados

ZAL - Zona Asturico-Leonesa

ZAOL - Zona Astúrica-Occidental Leonesa

ZC - Zona Cantábrica

ZCI - Zona Centro Ibérica

ZGC - Zona Galaico-Castelhana

ZGTM - Zona Galiza Trás-os-Montes

ZLA - Zona Luso-Alcúdice

ZOM - Zona de Ossa Morena

ZSP - Zona Sul Portuguesa



CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Com esta investigação, em termos de objectivos prioritários, pretende-se:

1. Identificar e delimitar plumas de contaminação provenientes do Vazadouro Controlado (VC) de Matosinhos utilizando métodos geofísicos;
2. Validar a delimitação das plumas de contaminação oriundas do VC, pela aplicação de métodos geoestatísticos e geoquímicos;
3. Distinguir zonas contaminadas de zonas não contaminadas na área de estudo, com base em critérios suportados por métodos estatísticos;
4. Distinguir as duas zonas que compõem o VC;
5. Verificar se a geologia existente na área de estudo constitui, por si só, uma barreira à dispersão de contaminantes;
6. Verificar se a espessura e eficácia das camadas de impermeabilização utilizadas na base e no topo do VC foram suficientes e adequadas para evitar a dispersão de contaminantes;
7. Contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia mais objectiva para definir plumas de contaminação, que permita comparar locais de deposição de resíduos em contextos geológicos distintos de forma volumétrica.

Para atingir os objetivos definidos, foi seguida a seguinte metodologia:

1. Pesquisa, recolha e compilação de bibliografia e dados existentes sobre a área de estudo e sobre as várias áreas científicas que estão envolvidas no projecto, com especial atenção para os métodos de prospecção geofísica e sua aplicação a estudos relacionados com a contaminação proveniente da deposição de resíduos. Trata-se de um processo de suporte científico, fundamental para a construção e evolução de toda a tese;
2. Reconhecimento de campo inicial com vista à avaliação das condições para a realização de campanhas de prospecção geofísica;
3. Produção de cartografia geológica à escala 1/10 000;
4. Execução de diversas campanhas de prospecção geofísica na área de estudo, utilizando os métodos da resistividade eléctrica, electromagnético e da sísmica de refacção;
5. Tratamento dos dados obtidos nas campanhas geofísicas;

6. Recolha de amostras de água para análise físico-química, como complemento às análises já existentes;
7. Tratamento dos dados geoquímicos relativos a todas as amostras de água na área de estudo;
8. Aplicação de métodos estatísticos, que normalmente são utilizados em dados geoquímicos, aos dados geofísicos;
9. Integração conjunta de todas as informações obtidas com vista à criação de um modelo tridimensional para a área de estudo e sua interpretação.

I.2. ESTADO DA ARTE

A produção de resíduos acompanhou desde sempre o ser humano. Os mais velhos resíduos do mundo foram encontrados na África do Sul e têm cerca de 140 mil anos de idade. Em Creta, no ano 3000 a.C., foram criados os primeiros “aterros” onde o lixo era colocado em grandes fossas e coberto com vários níveis de terra, e no ano 500 a.C., Atenas criou a sua lixeira municipal, decretando que os detritos fossem colocados a pelo menos 1,6 km das muralhas da cidade (Waste Watch, 2004).

Até meados do século XVIII, quando surgiram as primeiras indústrias na Europa, os resíduos eram produzidos em pequena quantidade, sendo constituídos essencialmente por elementos orgânicos. Com a Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII, que se expandiu pelo mundo a partir do século XIX, houve um grande crescimento da produção industrial e um aumento significativo da população, fatores que originaram um aumento da quantidade e diversidade do lixo produzido um pouco por todo o mundo.

No início do século XX surgem, em Inglaterra, os antecessores dos modernos aterros sanitários, os “*controlled tipping*”. Eram considerados inovadores na época, pois incluíam algumas preocupações e princípios de construção e exploração modernos para a época, nomeadamente a cobertura das células com terras ou outros materiais, com o objectivo principal de proteger a saúde pública (McBean et al., 1995).

Nas últimas décadas a produção de resíduos tem vindo a aumentar em quantidade e diversidade por todo o mundo, resultante da explosão demográfica, do crescimento económico e do aumento do poder de compra das famílias, acentuando-se também a produção de resíduos perigosos. Pelas mesmas razões têm surgido limitações em

termos energéticos, de matérias-primas e de espaço para deposição final de resíduos tornando-se cada vez mais difícil encontrar locais convenientes para o seu confinamento.

Segundo o Relatório do Estado Ambiente (REA) de 2011 (Vilão et al., 2011) entre 1995 e 2010 observou-se uma tendência de crescimento da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) em Portugal Continental. Em 2010 produziram-se cerca de 5,184 milhões de toneladas de RSU, ou seja, aproximadamente 511 kg/hab.ano, tendo sido as regiões do Norte e Lisboa responsáveis pela maior produção de RSU, com 31% e 39%, respectivamente. O destino final desses RSU foi, maioritariamente, a deposição em aterro (61%), seguindo-se a incineração com recuperação de energia (18%), a recolha selectiva com vista a reciclagem (13%) e a valorização orgânica (8%) (Vilão et al., 2011).

No entanto, até muito recentemente, a maioria dos resíduos era armazenada inadequadamente, por falta de condições e de conhecimento, sendo depositada sem controlo em lixeiras, rios e mares. Hoje em dia, e apesar de todo o conhecimento que existe sobre este assunto, ainda é possível observar, nalgumas florestas e cursos de água, casos de despejo indevido de resíduos diversos. Devido a estes problemas, semelhantes em qualquer parte do mundo, ao longo das últimas décadas começaram a ser adoptadas medidas para a redução da produção de resíduos, para um eficaz tratamento dos resíduos e para uma correcta deposição dos mesmos.

Numa tentativa de fazer face a esses problemas, mais concretamente na zona onde se localiza o foco de estudo do presente trabalho, o VC de Matosinhos, ocorreu, na última década, a recuperação ambiental daquilo que outrora foi uma lixeira a céu aberto. No decurso da referida recuperação ambiental foi efectuado um estudo dos resíduos depositados no local ao longo dos anos, tendo como objectivo principal aprofundar conhecimentos nos mecanismos de estabilização de resíduos em aterro de modo a contribuir para a identificação de problemas relacionados com a sua concepção, operação e encerramento (Russo, 2005).

Mas, no que diz respeito à resolução de todos os problemas associados aos resíduos, muito há ainda por fazer, sendo a monitorização ambiental dos locais de deposição de resíduos uma ferramenta essencial para avaliar e controlar os efeitos provocados pelo inadequado destino final dos resíduos. Na realidade, qualquer que seja a solução

adoptada para o tratamento de RSU, o seu confinamento final em aterro não é o fim do problema. Pelo contrário, a necessidade de monitorização contínua, acompanhando a evolução da massa de resíduos, não só na sua área envolvente imediata mas também numa envolvente mais alargada, permitirá avaliar as consequências ambientais da existência de um depósito de RSU.

A caracterização e monitorização ambiental de áreas onde se procede a confinamento final de RSU constituem, no âmbito de estudos de natureza ambiental, um domínio com desenvolvimento cada vez maior em termos do leque de trabalhos interdisciplinares envolvidos. Qualquer que seja o processo usado para efectuar o controlo ambiental, a metodologia usada para a aferição efectiva do grau do estado do ambiente ou as medidas a adoptar para a redução da produção de resíduos, a interligação de informações de diversas áreas científicas é essencial, pois permitirá um maior conhecimento do problema e consequentemente a adopção da solução mais adequada para cada caso.

Os métodos de prospecção geofísica constituem uma importante ferramenta para avaliação ambiental de uma área onde se procede ao confinamento de resíduos, motivo pelo qual foram utilizados na área de estudo, onde não existia qualquer tipo de trabalho desta natureza. Existem descritos exemplos da sua aplicação em estudos de contaminação relacionada com RSU desde finais da década de 60 (Cartwright & McComas, 1968) e início dos anos 70 (Stollar & Roux, 1975; Kelly, 1976).

Nas últimas décadas, os métodos de prospecção geofísica, mais concretamente os métodos eléctricos, têm sido utilizados por diversos investigadores para estudar a contaminação em solos e águas subterrâneas. Como forma de abordar os estudos mais recentes sobre a aplicação de métodos eléctricos a casos de contaminação associada à deposição de RSU, segue-se a descrição sucinta de alguns desses casos, aos quais se associam muitas vezes outros métodos de prospecção geofísica complementares. De forma a uma visualização mais rápida e selectiva optou-se por colocar a informação pesquisada sob a forma de tabela. Na primeira tabela destacam-se os estudos que incidem fundamentalmente no estudo da pluma de contaminação proveniente do aterro, sua detecção e delimitação (Tab. I.1). Na segunda tabela estão indicados os trabalhos com objectivos relacionados com o aterro/lixreira, os seus limites e o seu conteúdo (Tab. I.2).

Tabela I.1 – Síntese de trabalhos recentes relacionados com a aplicação de métodos de prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação provenientes de aterros.

AUTOR	MÉTODO GEOFÍSICO	OBJETIVO DO ESTUDO
Depountis et al (2005) Mota et al (2004) Olofsson et al (2006) Yogeshwar et al (2012)	RE RE RE + GPR RE + RMT	Detectar a pluma de contaminação do aterro
Xavier & Beckenbrock (2005)	RE	Determinar o fluxo da pluma de contaminação e a base do aterro
Al-Tarazi et al (2008) Gallas et al (2005) Lago et al (2006) Laureano & Shiraiwa (2008) Martinho & Almeida (2006) Monteiro Santos et al (2006) Mondelli et al (2007) Moreira & Braga (2009a) Moreira & Braga (2009b) Pereira & Lima (2007) Pujari (2007) Souza (2007) Ustra (2008) VanGiang et al (2010)	EM RE RE + IP + SP EM + GPR IP + RE EM RE IP IP + RE RE RE + GPR RE + IP + EM RE + IP EM + GPR	Detectar e delimitar a pluma de contaminação do aterro
Al-Tarazi et al (2006) Legaz et al (2009) Legaz (2010)	RE IP + RE IP + RE	Definir a forma da pluma de contaminação e os limites do aterro
Bortolin & Malagutti Filho (2011)	RE	Monitorizar ao longo do tempo a contaminação proveniente do aterro
Aristodemou & Thomas-Betts (2000)	RE + IP	Acompanhar a evolução da pluma de contaminação e distinguir as diferentes partes do aterro
Matias & Hermozilha (2006) Hermozilha et al (2010)	GPR + RE GPR + RE	Acompanhar a evolução da pluma de contaminação ao longo do tempo, investigar a sua estrutura interna, a espessura e eficácia das camadas de cobertura e de base do aterro

EM – electromagnético; GPR – georadar (*ground-penetrating radar*); SP – potencial espontâneo (*self potencial*); IP – polarização induzida (*induced polarization*); RE – resistividade eléctrica; RMT – rádio magneto telúrica.

Conforme se pode observar pela análise das tabelas I.1 e I.2, diferentes investigadores consideram que os métodos de prospecção geofísica têm grande aplicabilidade na identificação e na delimitação de plumas de contaminação provenientes de zonas de deposição de resíduos

Tabela I.2 – Síntese de trabalhos recentes relacionados com a aplicação de métodos de prospecção geofísica ao estudo de aterros/lixeiros.

AUTOR	MÉTODO GEOFÍSICO	OBJETIVO DO ESTUDO
Green et al (1999)	RE + EM + SR + GPR	Delimitar o aterro, estimar o seu conteúdo e diferenciar litologias
Orlando & Marchesi (2001) Porsani et al (2004)	RE + GPR RE + GPR	Determinar a extensão e os limites do aterro
Soupios et al. (2007a)	RE	Determinar a espessura dos resíduos depositados e avaliar o local de implantação de novos resíduos
Frangos (1997) Genelle et al (2011) Genelle et al (2012)	RE RE RE	Detectar fugas de lixiviados pelas camadas de cobertura do aterro
Abu-Zeid et al (2004) Bernstone et al (2000)	IP + RE RE	Investigar a estrutura interna do aterro
Pomposiello et al (2009) Soupios et al. (2007b)	RE RE + EM + SR	Determinar a espessura dos resíduos enterrados, a diferenciação dos resíduos e a presença de lixiviados
Bavusi et al (2006) Moura & MalaguttiFilho (2003) Silva et al (2002)	IP + RE + SP IP + RE RE + EM	Determinar os limites da lixeira/aterro e zonas de acumulação de lixiviados
Holub (2010)	IP + RE	Determinar o conteúdo do aterro e o seu volume
Leroux et al (2010)	IP + RE	Comparar aterros com diferentes conteúdos em matéria orgânica, no mesmo contexto geológico
Auken et al (2011)	IP + RE	Delimitar e caracterizar o aterro
Dahlin et al (2010)	IP + RE	Delimitar o aterro, determinar a espessura e a qualidade da camada de cobertura do aterro.
Mantlik et al (2009)	GPR + RE	Delimitar o aterro e diferenciar o seu conteúdo

EM – electromagnético; GPR – georadar (*ground-penetrating radar*); SP – potencial espontâneo (*self potencial*); IP – polarização induzida (*induced polarization*); RE – resistividade eléctrica; SR – refração sísmica (*seismic refraction*).

Também é possível verificar que a aplicação integrada de dois ou mais métodos de prospecção geofísica continua a ser largamente utilizada neste tipo de estudos, uma vez que constitui uma forma de confirmar a presença de zonas anómalas relacionadas com os lixiviados provenientes de áreas onde se procede à deposição de resíduos, contribuindo para uma análise mais segura dos resultados obtidos.

Devido aos avanços técnicos e científicos dos últimos anos, a utilização dos métodos geofísicos tornou-se mais frequente, conforme se pode comprovar pelo número de estudos publicados, tendo-se assistido a um grande desenvolvimento, tanto nas formas de abordagem e contextos de emprego, como no desenvolvimento de equipamentos e *software* (Figueiras et al., 2009; Monteiro Santos et al., 2006; Mota et al., 2004; Loke et al., 2013).

Os métodos geofísicos têm sido usados não só para estudar e delimitar plumas de contaminação provenientes de aterros, mas também para monitorizar a sua evolução com o tempo (Benson et al., 1983; Greenhouse et al., 1989; Matias et al., 1994). Actualmente os trabalhos de prospecção geofísica inovadores em locais de deposição de RSU desenrolam-se sobre eles próprios e envolvem estudos geofísicos a 4D, repetindo campanhas geofísicas nos mesmos locais em diferentes épocas, permitindo a monitorização da pluma de contaminação ao longo do tempo (Brewster et al., 1995; Matias & Hermozilha, 2006; Hermozilha et al., 2010).

Mas algo que ainda não foi efectuado na área da geofísica ambiental foi o estabelecimento de valores limite entre anomalia geofísica e *background* geofísico para um determinado local. Existem sim diversos estudos que fazem este tipo de distinção, mas para o caso de dados geoquímicos (Lepeltier, 1969; Matschullat et al., 2000; Nakic et al., 2007). Deste modo surge a ideia de aplicar métodos estatísticos, vulgarmente utilizados na análise de dados geoquímicos, a dados geofísicos, com o intuito de, efectivamente, distinguir entre aquilo que são valores geofísicos anómalos e aquilo que corresponde a valores geofísicos de fundo do local em estudo.



CAPÍTULO II

ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

II.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

A área em estudo situa-se no local de implantação do Vazadouro Controlado (VC) de Matosinhos e sua envolvente imediata (Fig. II.1), localizada no nordeste de Portugal Continental, distrito do Porto, concelho de Matosinhos, junto da localidade de Santa Cruz do Bispo (coordenadas geográficas, Datum WGS84: 41°13'18"N; 8°39'24"W). Esta área é abrangida pela Carta Militar de Portugal - folha nº110, à escala 1/25 000, do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE, 1998).

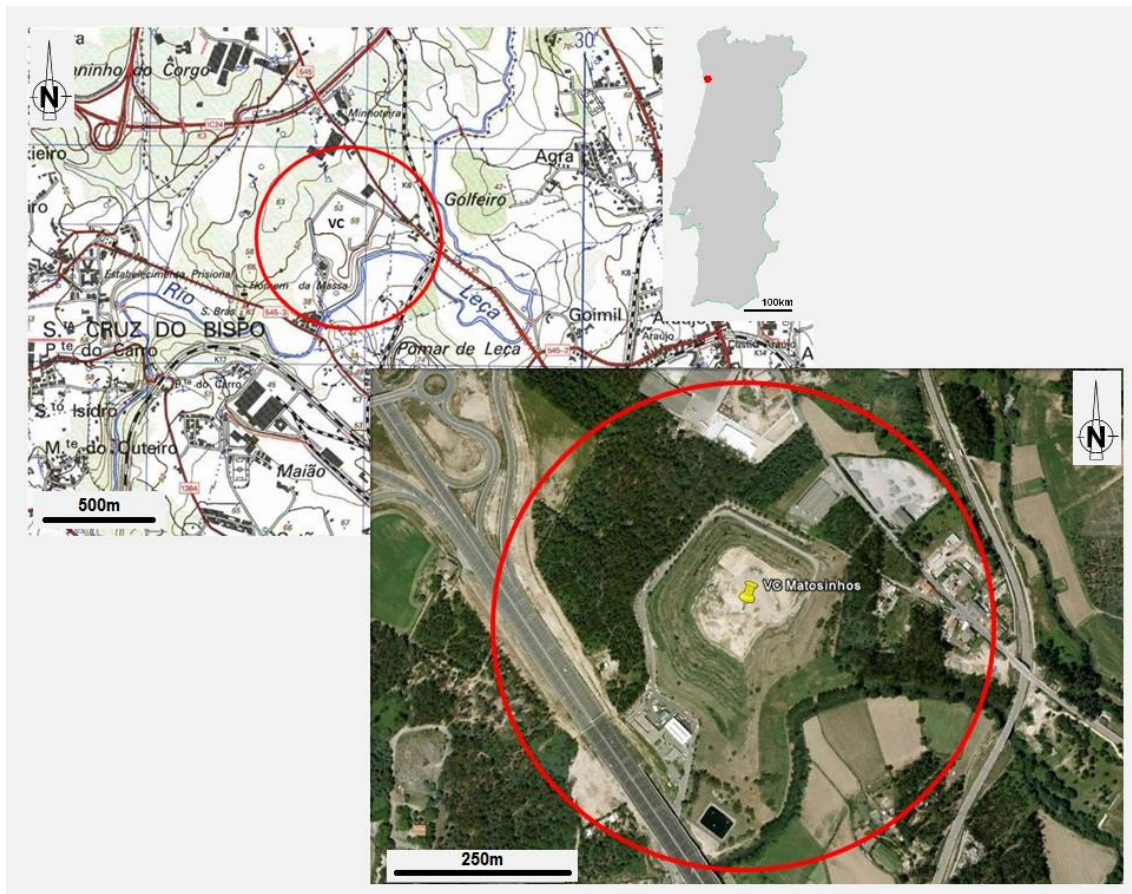


Figura II.1 – Localização Geográfica do VC de Matosinhos. Adaptado da Carta Militar de Portugal - folha nº110 (IGeoE, 1998) e Google Earth (2007).

O VC está situado numa área relativamente plana, com altitudes inferiores a 100m (Fig. II.2). A cota máxima do VC corresponde a 60m. O Monte de S. Brás com 66m de altitude, localizado a SW do VC, é a elevação natural mais próxima da área de estudo.

O VC é delimitado a SE pelo rio Leça, principal linha de água da área de estudo, que se desenvolve depois em direcção ao oceano Atlântico com orientação NE-SW (Fig. II.2). As restantes linhas de água que percorrem o local em estudo têm orientações dominantes NW-SE e N-S.

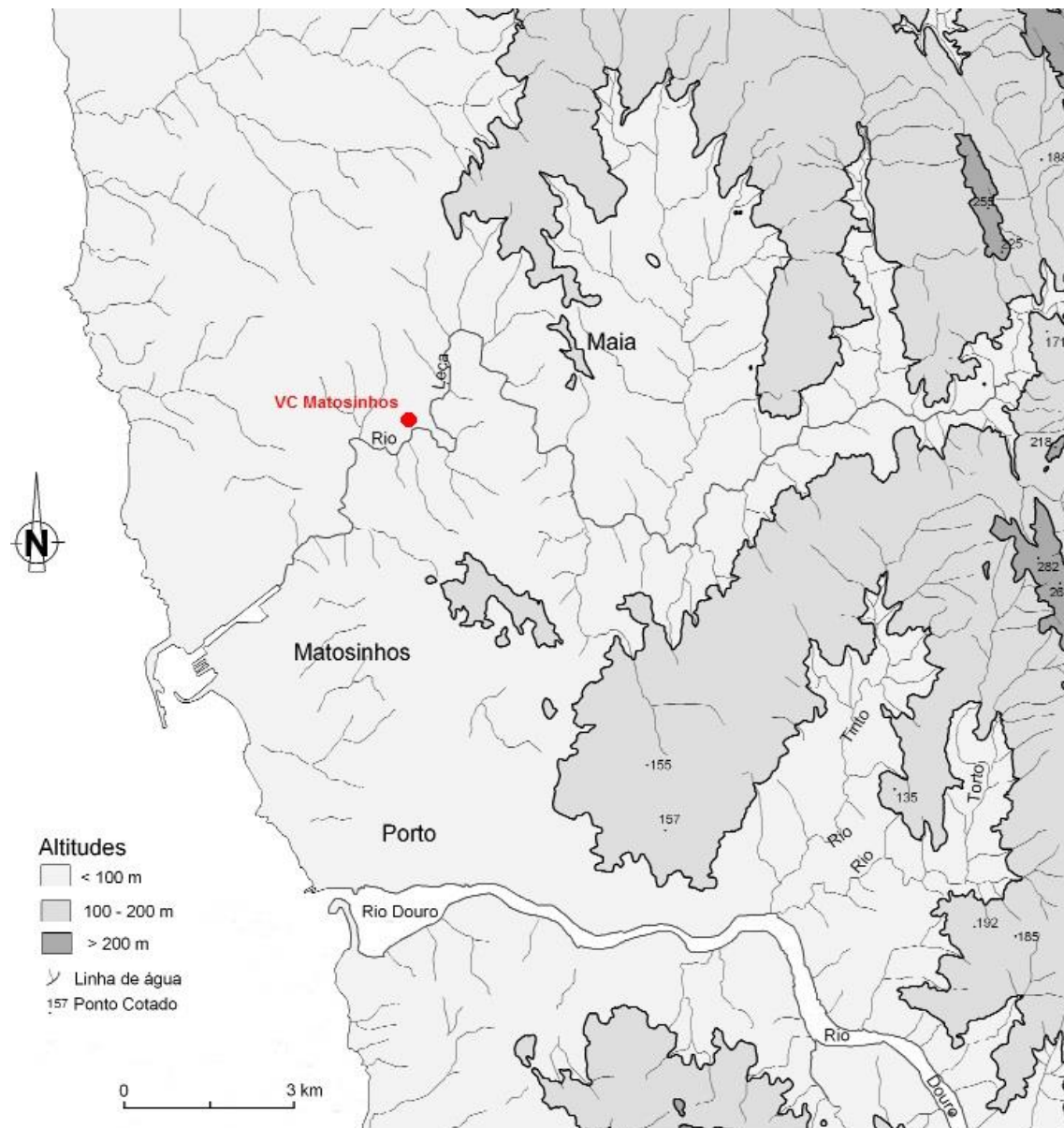


Figura II.2 – Hipsometria e rede hidrográfica da região do Porto (adaptado de Coxito Afonso, 2003).

II.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

II.2.1. GEOLOGIA REGIONAL

A região do Porto, onde está inserida a área de estudo, enquadra-se no Maciço Ibérico (MI), que faz parte da Cadeia Hercínica Europeia. O MI corresponde a uma extensa área aplanada que Lotze (1945) dividiu em seis zonas com características paleogeográficas, tectónicas, magmáticas e metamórficas distintas: Zona Cantábrica (ZC), Zona Asturico-Leonesa (ZAL), Zona Galaico-Castelhana (ZGC), Zona Luso-Alcúdice (ZLA), Zona de Ossa Morena (ZOM) e Zona Sul Portuguesa (ZSP).

Posteriormente Julivert et al (1974) unificaram a ZGC e a ZLA definindo a Zona Centro Ibérica (ZCI) e propuseram a existência na ZCI da Sub-Zona Galiza-Trás-os-Montes, que posteriormente Farias et al (1987) redefiniram como Zona Galiza Trás-os-Montes (ZGTM).

Em 1990, Dallmeyer & Martinez-Garcia produziram uma síntese relativa ao zonamento do MI estabelecendo as seguintes zonas (Fig. II.3): Zona Cantábrica (ZC), Zona Astúrica-Occidental Leonesa (ZAOL), Zona Galiza Trás-os-Montes (ZGTM), Zona Centro Ibérica (ZCI), Zona de Ossa Morena (ZOM) e Zona Sul Portuguesa (ZSP).

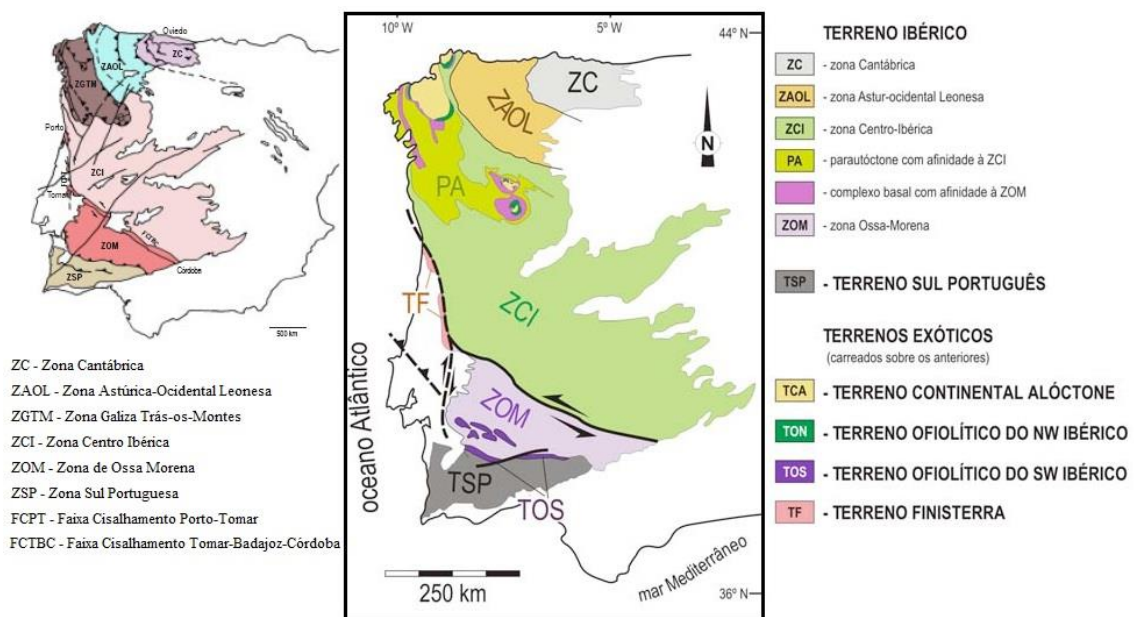


Figura II.3 – Zonamento do Maciço Ibérico: à esquerda, síntese de vários autores *in* Chaminé (2000); à direita, adaptado de Ribeiro et al (2007) *in* Dias & Ribeiro 2010.

Como resultado da evolução do conhecimento científico foram-se sucedendo diversas alterações ao longo dos tempos na divisão do MI, surgindo também uma análise com base na perspectiva de Terrenos Tectonoestratigráficos (Ribeiro et al 1990). Actualmente consideram-se no MI os seguintes Terrenos Tectonoestratigráficos (Ribeiro et al 2007): Terreno Ibérico, inclui a ZC, ZAOL, ZCI e ZOM; Terreno Sul Português e Terrenos Exóticos (Terreno Continental Alóctone, Terrenos Ofiolíticos do NW e do SW Ibérico e Terreno Finisterra) (Fig. II.3).

A área em estudo está inserida na ZCI que corresponde à zona mais interna da Cadeia Hercínica ou Varisca, muito próximo da Faixa de Cisalhamento Porto-Tomar (FCPT) com direção geral NNW-SSE. A FCPT separa a ZCI da ZOM (Chaminé et al 2003), ou o Terreno Ibérico do Terreno Finisterra (Dias & Ribeiro, 2010). Os terrenos da ZCI representam o autóctone do orógeno hercínico. São essencialmente constituídos por rochas metassedimentares do “Complexo Xisto-Grauváquico” (CXG) intruídas por intenso magmatismo granítico (Noronha, 2000).

A região do Porto é caracterizada pela predominância de rochas graníticas de idade hercínica e/ou pré-hercínica (Chaminé, 2000; Noronha & Leterrier, 2000), maioritariamente granitóides de duas micas, de grão médio e textura granular ou porfiróide. Neles se inclui o granito do Porto, que é um granito hercínico, onde se enquadra a área de estudo, razão pela qual se dará especial importância à sua caracterização.

No seu conjunto o maciço granítico do Porto define um alinhamento NW-SE, devido à estruturação hercínica, contactando a Este com o CXG ante-Ordovícico e a Oeste com o Complexo Metamórfico da Foz do Douro (Noronha & Leterrier, 2000).

O granito do Porto foi descrito, na notícia explicativa da folha 9-C-Porto da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000 (Carrington da Costa & Teixeira 1957), como um granito alcalino, de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas. Na notícia explicativa da folha 1 da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200 000, Simões (1992) classifica o granito do Porto como alóctone, de grão médio, de duas micas e sin-tectónico relativamente à terceira fase da Orogenia Hercínica (F3). Almeida (2001) descreve-o como um granito de duas micas (com predomínio da moscovite sobre a biotite), de grão médio, por vezes ligeiramente orientado, sendo

predominantemente não porfiróide (localmente pode revelar-se com tendência porfiróide), com uma granularidade variando de média a grosseira e de fina a média.

De acordo com diversos autores (Ferreira et al, 1987; Simões, 1992) o granito do Porto é um granito sintectónico relativamente à terceira fase da Orogenia Hercínica. A fase F3, que correspondeu à fase em que as tensões compressivas máximas estavam orientadas NE-SW, além de responsável por dobramentos NW-SE e cisalhamentos dúcteis NNW-SSE e ENE-WSW implicou também fracturação frágil NNE-SSW e ENE-WSW, registada, particularmente, nos maciços graníticos de duas micas sintectónicos relativamente a F3, onde por vezes se instalaram filões aplito-pegmatíticos. Posteriormente a F3, actuaram fases tardias Variscas sob a acção de uma tensão compressiva máxima N-S, o que implicou o “rejogo” das fracturas geradas, principalmente, durante o período terminal de F3. Foi neste período que o sistema frágil NNE-SSW atingiu maiores proporções (Ribeiro & Pereira, 1992).

Noronha et al (1979) correlacionaram as fases de deformação hercínica no NW Peninsular com o metamorfismo regional e o magmatismo reconhecendo três níveis estruturais (superior, intermédio e inferior) que acompanham a sucessão das isógradas do metamorfismo regional, tendo verificado que de uma maneira geral os níveis inferiores afloram nos núcleos dos antiformas F3, responsáveis pelas amplas estruturas regionais, por sua vez sublinhadas por diversas intrusões graníticas, nomeadamente de granitos de duas micas sintectónicos relativamente a F3. Assim, no que se refere a rochas graníticas, F3 está marcadamente patente em enormes massas de granitos, evidenciando a existência de um importante período de distensão imediatamente anterior a esta fase, que permitiu a sucessiva subida dos magmas na crosta (Ferreira et al, 1987).

Relativamente à geocronologia do granito do Porto, Priem et al. (1967) obtiveram, pelo método Rb-Sr, idades compreendidas entre 305 ± 10 Ma a 307 ± 10 Ma, isto é, uma idade intra-Vestefaliana de acordo com a escala do tempo geológico de Harland et al. (1989). Trabalhos posteriores indicam idades de 312 ± 10 Ma e $344,8 \pm 4,3$ Ma (Priem et al, 1970; Abranches et al, 1979). A datação mais recente do granito do Porto, com base no método geocronológico U-Pb, refere a idade de 318 ± 2 Ma correspondendo a uma idade Namuriana Superior a Vestefaliana Inferior, comprovando o enquadramento geológico posto em evidência pelos estudos de campo, petrográficos e geoquímicos (Almeida, 2001; Martins et al, 2001).

II.2.2. CARTOGRAFIA À ESCALA 1/10 000

A cartografia geológica é particularmente importante para o presente estudo, uma vez que para a construção de um modelo de dispersão de contaminantes será necessário perceber os factores que condicionam o fluxo dos fluidos provenientes do VC. Em zonas graníticas, onde a circulação de fluidos ocorrerá essencialmente nas zonas fracturadas é importante a identificação de descontinuidades, tais como diáclases, contactos geológicos, filões e falhas, bem como o estudo da alteração das formações geológicas presentes. Enquanto a alteração será responsável pelo fluxo na parte superior do maciço, as descontinuidades serão responsáveis pela circulação em profundidade.

A cartografia mais pormenorizada referente à área de estudo data de 1957 e corresponde à Carta Geológica 9-C (Fig. II.4), tendo sido descrita na altura esta zona como parte do conjunto de migmatitos, gnaisses e micaxistos pertencentes ao CXG ante-Ordoviciano (Carrington da Costa & Teixeira, 1957). Também na edição da Folha 1 da Carta Geológica 1/200 000 (Pereira, 1989), a área em estudo está descrita como pertencente às formações metassedimentares do CXG, fazendo parte de uma zona influenciada por estruturas com orientação aproximada NE-SW e NW-SE.

Para melhor caracterizar o enquadramento geológico do VC de Matosinhos, após análise da cartografia e fotografia aérea existente foi feito o reconhecimento geológico de campo, com vista à elaboração de cartografia à escala 1/10 000. Para esse efeito foram então cartografados todos os afloramentos existentes na envolvente imediata do VC, identificadas as estruturas presentes e representados na carta “Enquadramento Geológico do VC de Matosinhos – Porto” (Fig. II.5). Com esta cartografia detectou-se que a área de estudo se enquadra claramente numa zona granítica, ao contrário do que se pode deduzir da cartografia anterior (Carrington da Costa & Teixeira, 1957; Pereira, 1989; Oliveira, 1992),

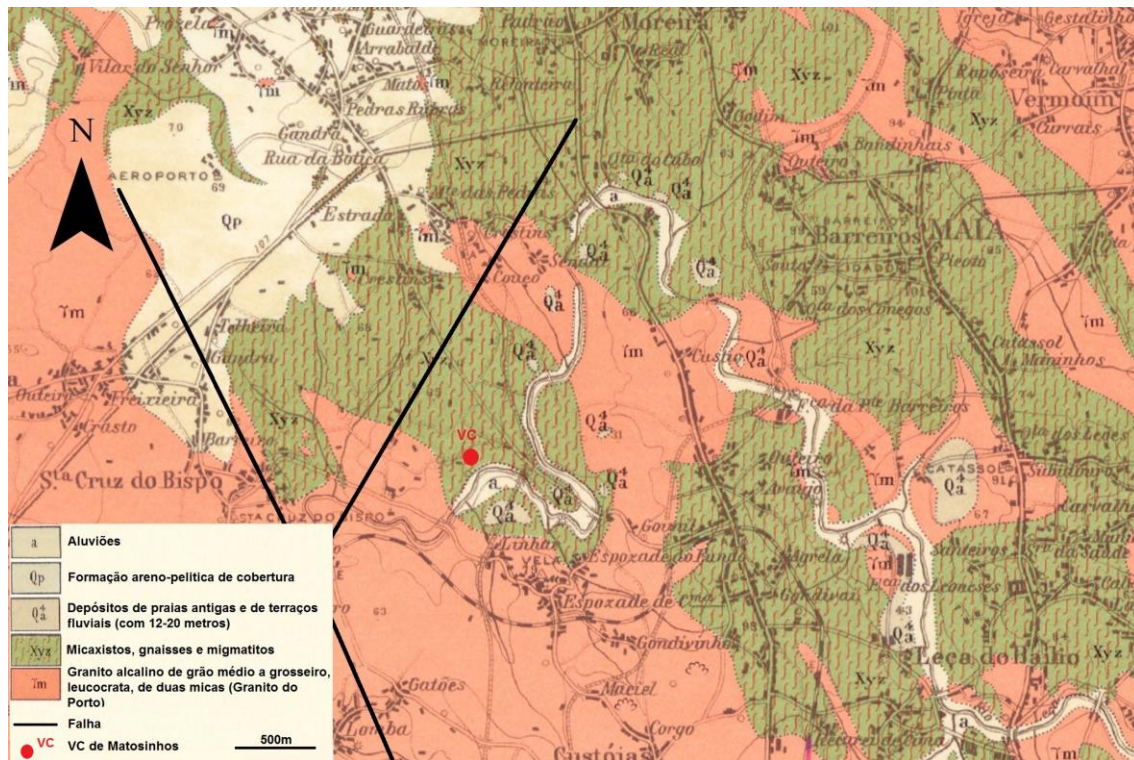


Figura II.4 – Enquadramento Geológico do VC de Matosinhos adaptado de Folha 9-C, à escala 1/50 000 (Carrington da Costa & Teixeira, 1957) e de Folha 1 à escala 1/200 000 (Pereira, 1989).

Na área de estudo, observa-se um granito de duas micas, leucocrata, com uma textura de grão médio a fino. Os sistemas de fracturação, identificados para a área em estudo, apresentam orientações de NW-SE a NNW-SSE e NNE-SSW a ENE-WSW, estando de acordo com os principais sistemas de fracturação regional. Em grande parte da envolvente do VC, o granito encontra-se alterado a muito alterado (Fig. II.6a), tendo sido também identificados locais onde o granito se encontra pouco alterado (Fig. II.6b-f), segundo a classificação do *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981).

Segue-se uma breve descrição de duas estações de observação geológica, identificadas como #1 e #2 na Fig. II.5, onde foi possível pormenorizar o estudo do maciço rochoso. Na estação de observação geológica #1, situada no monte de S. Brás (Fig. II.6b,c), o granito apresenta-se pouco alterado e pouco fracturado, com megacristais de feldspato, e por vezes com aglomerados de cristais de turmalina.

Na estação de observação geológica #2, situada em Pomar de Leça, ocorre um granito intruído por vários filonetes pegmatíticos com cristais de turmalina (Fig. II.6d). Este granito apresenta-se pouco alterado e medianamente fracturado, situação reconhecida através dos sinais de meteorização na superfície das fracturas, que aparecem em todo o maciço rochoso (Fig. II.6e, f).



Figura II.6 – Envolvente granítica do VC de Matosinhos: a – barreira com granito muito alterado, junto à linha de metro; b - afloramento de granito pouco alterado, em #1; c – pormenor do granito, em #1; d – filonete pegmatítico com cristais de turmalina, em #2; e, f - pormenores da fracturação do granito em #2.

II.2.3. SONDAGENS MECÂNICAS

Aquando da construção das infra-estruturas para a Central de Valorização Energética do Biogás do VC de Matosinhos, foram realizadas sondagens mecânicas, junto à entrada sul do VC (Fig. II.5). De acordo com os relatórios dessas sondagens, o maciço granítico alterado (W3/4) foi alcançado aos 6m de profundidade, sendo coberto por 3m de terra vegetal (solo areno silto-argiloso) e 3m de aterro (constituído por material de origem diversa) até à superfície (Fig. II.7).

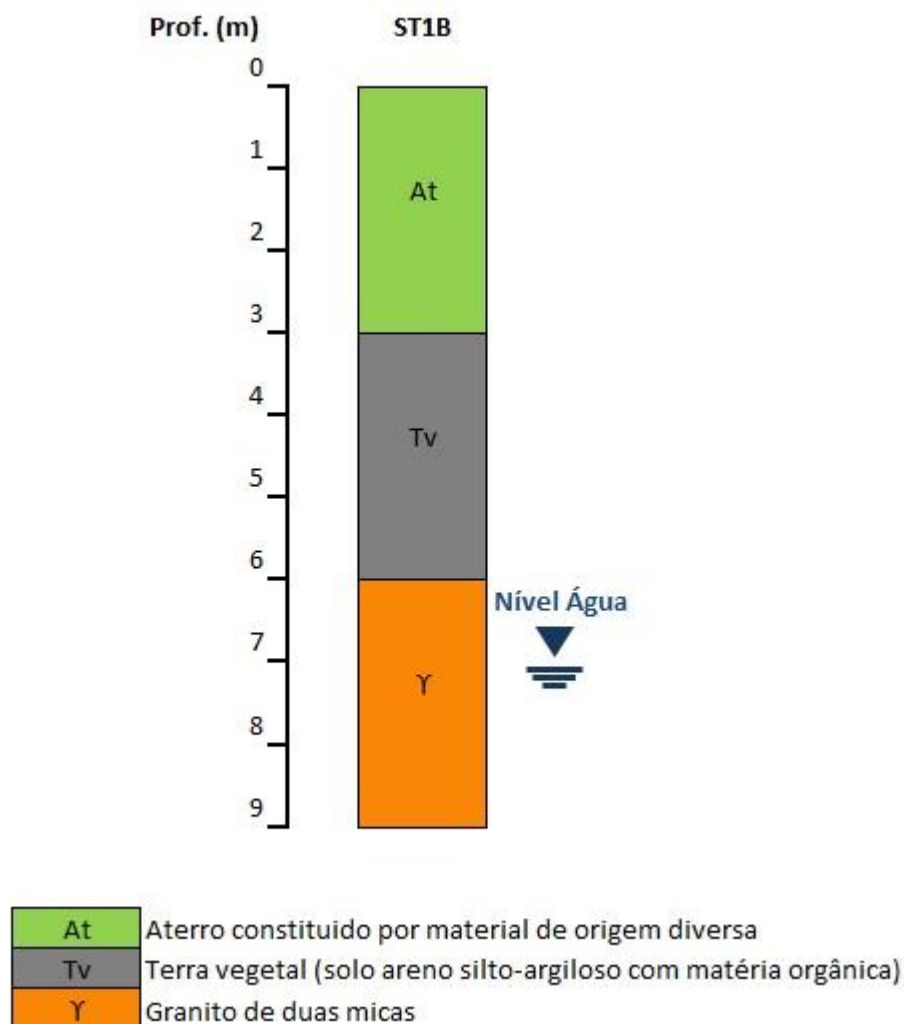


Figura II.7 – Perfil tipo obtido com a realização de sondagens mecânicas, no local designado por “S” na figura II.5.

II.2.4. PETROGRAFIA

Os sinais de deformação e alteração do granito, observados no campo, foram reforçados pelo estudo microscópico. O estudo microscópico revelou fenómenos indicadores de forte deformação e micro-fracturação do granito, da circulação de fluidos nessas mesmas fracturas que causaram a alteração de minerais já existentes e a formação de novos minerais.

Segue-se uma breve descrição petrográfica do granito da área de estudo com base na amostragem realizada na estação de observação geológica #2 (Fig. II.5). A amostra de granito apresenta uma textura hipidiomórfica granular, de grão médio a fino, tendo como minerais essenciais: quartzo, plagioclase, feldspato potássico, moscovite, e biotite (Fig. II.8).

O quartzo xenomórfico é abundante, ocorrendo em grãos de média dimensão que apresentam extinção ondulante sendo possível observar no seu interior abundantes inclusões fluidas de reduzidas dimensões (Fig. II.9). A plagioclase apresenta-se em grãos xenomórficos de média dimensão, encontrando-se muitas vezes sericitizada e moscovitizada. O feldspato potássico (ortoclase), com grãos hipidiomórficos de maior dimensão relativamente aos restantes minerais, exhibe a macla Carlsbad. A moscovite é mais abundante que a biotite. A moscovite ocorre em grãos hipidiomórficos, por vezes orientada e deformada. A biotite xenomórfica exhibe pleocroísmo de castanho claro a castanho-escuro, contendo inclusões de zircão com abundantes halos pleocróicos. Em alguns grãos observa-se a cloritização da biotite. Identificou-se também uma clorite tardia, formada devido à percolação de fluidos ao longo de uma micro-fractura (Fig. II.8).

Uma vez que o granito do Porto é um granito sintectónico, salienta-se o papel desempenhado pela deformação que se traduz essencialmente na orientação e encurvamento dos minerais micáceos e na acentuada extinção ondulante do quartzo. As associações mineralógicas tardias, observadas no granito sugerem a existência de um processo de alteração a baixa pressão e temperatura intermédia.

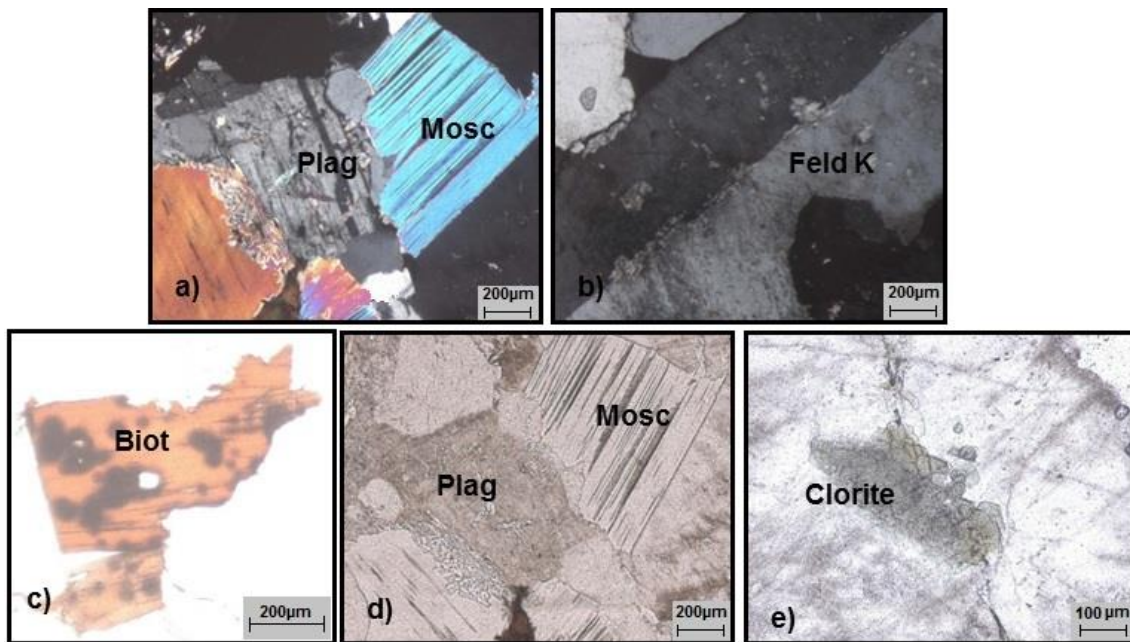


Figura II.8 – Minerais observados em lâmina delgada (a – moscovite e plagioclase, em nicóis cruzados; b – feldspato potássico em nicóis cruzados; c – biotite com inclusões de zircão em nicóis paralelos; d – moscovite e plagioclase, em nicóis paralelos; e – clorite em nicóis paralelos).

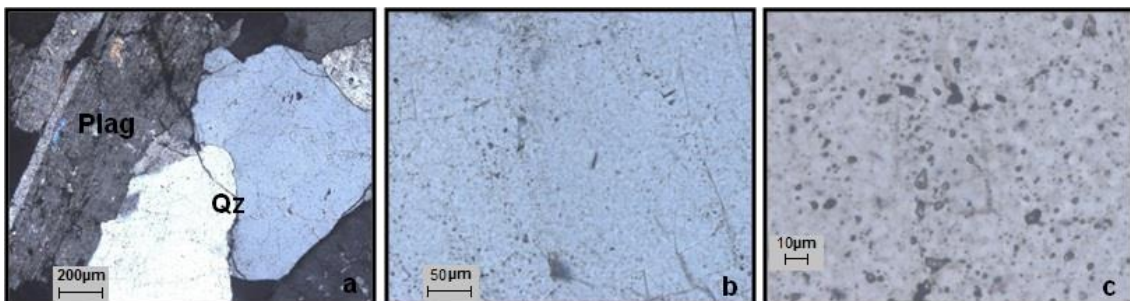


Figura II.9 – a - plagioclase e quartzo em nicóis cruzados; b, c - inclusões fluidas no quartzo.

II.3. ENQUADRAMENTO AMBIENTAL

Pretende-se com este subcapítulo abordar de uma forma sucinta os potenciais problemas ambientais que, de alguma forma, possam contribuir para o actual estado do ambiente na área de estudo. Para tal, fez-se a identificação dos possíveis focos poluidores na envolvente da área de estudo (Fig. II.10). O objecto de estudo do presente trabalho, o VC de Matosinhos, foi considerado um potencial foco poluidor da região, no entanto existem outros resultantes da actividade humana, que numa envolvente mais alargada poderão contribuir para a poluição das águas (subterrâneas e superficiais), do ar e do solo da região.

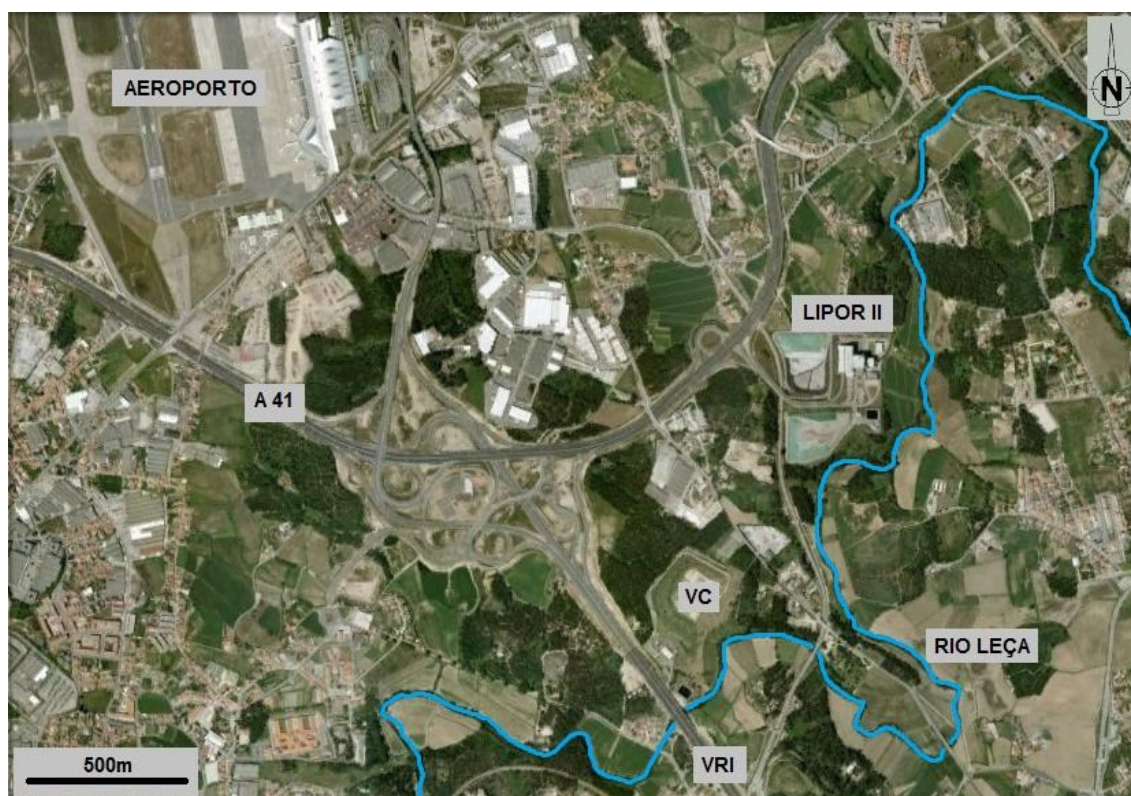


Figura II.10 – Potenciais focos de poluição na envolvente da área de estudo: VC, Rio Leça, Lipor II, tráfego rodoviário (ex: A41 e VRI), aeroporto e, dispersas pela área de estudo, as actividades doméstica, industrial e agrícola).

A identificação dos potenciais focos causadores de poluição ambiental torna-se importante na medida em que constitui o primeiro passo para a escolha da metodologia mais indicada, para determinar de forma efectiva quais as fontes poluidoras e o impacte real que estas podem provocar no ambiente. Identificados os locais potencialmente contaminados e a origem da sua contaminação poder-se-ão

definir e implementar as medidas mais adequadas para minimizar os efeitos poluidores nos ecossistemas e nas populações aí residentes.

No âmbito do presente estudo, além de identificar os potenciais focos poluidores, importa referir o que levou a que estes fossem assim considerados e qual a realidade da situação actual para cada um, de forma a ter uma perspectiva geral do estado ambiental na área de estudo.

II.3.1. ÁGUAS E SOLO

Como potenciais focos poluidores das águas (superficiais e subterrâneas) e solo referenciam-se em particular: o VC de Matosinhos, o rio Leça, a actividade agrícola e a Central de Valorização Energética: Lipor II.

O VC de Matosinhos foi considerado um potencial foco poluidor da área de estudo visto que se trata de um local de deposição de RSU que, após ter sido uma lixeira, não se encontra devidamente impermeabilizado em toda a sua extensão, possibilitando dessa forma a infiltração de lixiviados nas águas e solos do meio envolvente. Existe um plano de monitorização a cargo da empresa SUMA (Serviços Urbanos e Meio Ambiente) que contempla análises periódicas da água recolhida nos piezómetros existentes na envolvente imediata ao VC, que revelaram a presença de concentrações anómalas de elementos que merecerão discussão aprofundada em capítulo próprio, motivo pelo qual não são agora referidos. Relativamente à libertação de gases provenientes da decomposição das fracções orgânicas ao longo do tempo em regime anaeróbico, o VC de Matosinhos possui um sistema de captação e controle do biogás produzido, culminando na combustão directa dos gases sob condições específicas para eliminar a possibilidade de emissão de componentes com algum grau de risco para a atmosfera. A Central de Valorização Energética do Biogás produz energia eléctrica que é introduzida no Sistema Eléctrico Português, sendo assim uma forma de aproveitamento de uma fonte renovável.

O rio Leça nasce no concelho de Santo Tirso e atravessa no seu percurso os concelhos de Valongo, Maia e Matosinhos, tendo já sido considerado um dos rios mais poluídos de Portugal, tem sido alvo de medidas de despoluição ao longo do seu percurso. Contudo, e apesar dessas medidas, o rio Leça pode ser considerado um potencial foco de poluição, uma vez que ao longo do seu percurso ocorrem descargas

de águas residuais domésticas e industriais, sem tratamento prévio, directamente no rio. As prováveis fugas provenientes do VC de Matosinhos que são alvo do presente estudo, poderão também contribuir para a contaminação do rio Leça a jusante do VC. O Projecto Corrente Rio Leça iniciado no concelho de Valongo em 2007, em conjunto com 14 instituições, ao qual se juntou em 2008 o município da Maia, pretende despoluir a água do Leça através da eliminação das ligações clandestinas de esgotos e correcta ligação à rede de saneamento, bem como da limpeza e recuperação ecológica das margens, dando especial importância à sensibilização das populações para que estas se sintam parte integrante de todo o processo (<http://www.correnterioleca.com>). A recuperação do rio Leça é possível, mas muito há ainda por fazer, e implicará acções de fiscalização e monitorização ambiental em todo o seu percurso, envolvendo todos os municípios que este rio atravessa.

A actividade agrícola pode ser considerada um potencial foco poluidor, uma vez que nos campos agrícolas muitas vezes são usados pesticidas e fertilizantes que se podem infiltrar no subsolo, chegar aos lençóis de água subterrâneos e cursos de água. Os contaminantes podem ser armazenados no solo, mas a sua libertação subsequente pode seguir padrões muito diferenciados. Alguns, como os pesticidas, poderão vir a ultrapassar os limites da capacidade de armazenamento e de efeito tampão do solo, causando a danificação/perda de algumas das funções deste, a contaminação da cadeia alimentar, dos vários ecossistemas e recursos naturais, pondo em risco a biodiversidade e a saúde humana (<http://www.confagri.pt>). Nos campos agrícolas junto ao VC a água usada para rega é maioritariamente retirada do Rio Leça, situação que poderá implicar problemas na cadeia alimentar que deverão ser alvo de estudo aprofundado para confirmação. Trata-se de um problema cíclico de resolução complexa porque se por um lado esta actividade pode conduzir à contaminação de solos e águas com determinados elementos, por outro lado os campos agrícolas podem também sofrer influência de outros elementos transportados de outros locais, nomeadamente pelo rio Leça. Para avaliar o potencial impacte dos contaminantes do solo, há que ter em conta não só a sua concentração mas também o seu comportamento no ambiente e o mecanismo de exposição ao Homem. Serão necessárias acções de monitorização de solos e água para saber até que ponto estes contaminantes causam problemas nos ecossistemas envolventes. A monitorização de solos e água contribuirá para detectar os problemas na sua fonte e assim permitir uma maior rapidez na sua resolução, quando estes surgem, e uma minimização dos problemas já existentes de forma gradual, porque nenhuma acção de recuperação

ambiental acontece de um dia para o outro. A sensibilização das pessoas que desenvolvam a actividade agrícola e do consumidor final será um factor crucial para o sucesso a longo prazo deste tipo de intervenção ambiental.

A Central de Valorização Energética: Lipor II devido aos processos envolvidos no seu funcionamento poderá ser considerada um potencial foco causador de poluição da água, solo e também do ar. No entanto existe um plano de monitorização ambiental que permite controlar esses processos, minimizando o impacte do funcionamento da Central de Valorização Energética. Da combustão dos resíduos resultam gases e materiais inertes (cinzas e escórias) que representam riscos ambientais se forem lançados na natureza. Os principais componentes das escórias correspondem, essencialmente, à fracção de materiais não combustíveis e potenciam uma utilização como material granular, substituindo os solos ou os agregados naturais obtidos na indústria extractiva. As cinzas e outros resíduos de depuração gasosa são tratados com aditivos e sofrem um processo de cimentação, sendo transformados em blocos sólidos que têm como destino final a deposição em aterro. O aterro sanitário anexo à Central de Valorização Energética alberga apenas resíduos gerados pela incineração. Como forma de controlar as emissões resultantes do processo de queima de resíduos, a Lipor possui um programa de monitorização externa, centralizado no Instituto do Ambiente e Desenvolvimento da Universidade de Aveiro, designado PMExt LiporII (<http://pmext.idad.ua.pt/>). As actividades deste programa integram 32 estações de monitorização num raio de 10 km da unidade e incluem diversos descritores interrelacionados: ar, recursos hídricos, biota terrestre e aquático, ruído. Os diferentes aspectos estudados dividem-se em duas temáticas: a ambiental, com recolha e análise de amostras de ar, águas, sedimentos e solos agrícolas, medições de ruído, e a biológica, com a amostragem e análise de produtos (ex.: couve portuguesa, milho, batata, ovos, leite). Como exemplo desse conjunto de inter-relações, destaca-se a relação directa entre as potenciais contaminações ambientais e a saúde pública (<http://www.lipor.pt>).

Em resumo, pode dizer-se que o potencial foco de poluição que poderá ter maior impacte na contaminação das águas e solo da área de estudo trata-se do próprio VC, seguido do rio Leça e da actividade agrícola, sendo a Central de Valorização Energética: Lipor II o elemento com menor impacte nessa potencial contaminação.

II.3.2. AR E RUÍDO

A área em estudo é circundada por vários eixos rodoviários que devido ao constante tráfego podem constituir fontes de emissão de ruído e de poluentes para a atmosfera, mais significativos após a conclusão em 2006 da VRI (Via Regional Interior) e da A41-CREP (Circular Regional Exterior do Porto). Existem ainda na zona outras potenciais fontes de emissões sonoras e atmosféricas, como o Aeroporto de Sá Carneiro e algumas indústrias.

Relativamente às emissões atmosféricas, os concelhos da Maia e Matosinhos integram a rede de monitorização da qualidade do ar da Região Norte e possuem estações de monitorização da qualidade do ar, o que lhes permite avaliar periodicamente a concentração de poluentes, como Benzeno (C_6H_6), Dióxido de Enxofre (SO_2), Dióxido de Azoto (NO_2), Óxidos de Azoto (NO_x), Ozono (O_3), Monóxido de carbono (CO), Monóxido de Azoto (NO), Partículas $<10\mu m$ (PM_{10}). A combustão doméstica, industrial, as fontes móveis (tráfego rodoviário, ferroviário, marítimo, aéreo) são as principais fontes destes poluentes e no caso das PM_{10} também os incêndios florestais, as obras de construção civil e as areias transportadas pelos ventos com origem nos desertos de África. A concentração de O_3 depende de parâmetros meteorológicos e de um conjunto complexo de reacções fotoquímicas que envolve a interacção de gases poluentes como o NO_x , CO , Compostos Orgânicos Voláteis (COV), e o metano (CH_4).

As duas estações de medição da qualidade do ar mais próximas da área de estudo são as de Custóias-Matosinhos e Leça do Balio-Matosinhos (<http://www.qualar.org>). De acordo com os dados disponíveis em <http://www.qualar.org>, verificou-se que nos últimos anos, na estação de Custóias, não se verificaram excedências aos limites legalmente exigidos relativamente aos parâmetros C_6H_6 , SO_2 e CO , enquanto para os parâmetros O_3 , PM_{10} e NO_2 se verificaram excedências. Na estação de Leça do Balio verificou-se a mesma tendência, exceptuando no caso do C_6H_6 , para o qual não existem informações disponíveis.

Estes dados estão de acordo com aquilo que se verifica na Área Metropolitana do Porto (AMP) onde o SO_2 está em fase de declínio, graças ao uso crescente de substâncias com menos enxofre e da crescente generalização do gás natural em substituição de outros combustíveis mais poluentes, e a concentração de PM_{10} , NO_x ,

e O_3 é a mais elevada da Região Norte, sendo o O_3 troposférico cada vez mais um problema de saúde pública nas zonas urbanas da AMP (<http://ambiente.maiadigital.pt/ambiente>; http://www.cm-matosinhos.pt/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=10488).

No que diz respeito ao ruído, decidiu-se englobá-lo aqui por se tratar de um problema que apesar de afetar principalmente as populações residentes na área de estudo, tem também um impacte no ecossistema na medida em que elevados níveis de ruído podem afastar determinadas espécies, como por exemplo aves, trazendo modificações para todo o ecossistema. No entanto, na área de estudo este tipo de impacte não foi ainda estudado, existem apenas estudos que conduziram à elaboração de mapas de ruído. Foi levada a cabo pelo Laboratório de Acústica do Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a actualização dos mapas de Ruído do Concelho da Maia, tendo-se identificado como principais fontes de ruído o tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo, mais concretamente o Aeroporto e zona envolvente, não tendo expressão significativa o Sistema de Metro Ligeiro (Rocha & Oliveira Carvalho, 2008). No mapa do ruído global de 24 horas (L_{den} = nível diurno-entardecer-nocturno), verifica-se que os níveis sonoros predominantes se situam entre os 45 dB(A) e 60 dB(A). Junto às principais fontes de ruído, e numa faixa variável, esses valores de ruído ambiente são particularmente elevados, em especial nas vias rodoviárias hierarquicamente superiores e na zona de influência do Aeroporto. Foi também efectuada a Carta de Zonamento Acústico com vista à Delimitação de Zonas Sensíveis e Mistas em função dos seus usos e características sonoras. Está concluída a fase de diagnóstico do Plano Municipal de Redução de Ruído, com a identificação de zonas de conflito, ou seja, as zonas classificadas como sensíveis ou mistas onde se verifica a ultrapassagem dos valores limite de exposição previstos no Regulamento Geral do Ruído, pretendendo-se com base no trabalho de diagnóstico, identificar medidas de mitigação a adoptar e estabelecer uma hierarquização na sua implementação (<http://ambiente.maiadigital.pt/ambiente>).

No que diz respeito aos descritores ar e ruído, apesar de estes não serem o principal foco do presente trabalho, uma vez que o nosso estudo incide mais nas questões associadas às águas e solo, todas estas variáveis estão relacionadas e contribuem para uma avaliação global do estado ambiental da área de estudo, motivo pelo qual se inseriram no presente capítulo. Assim sendo, relativamente à potencial poluição

atmosférica e sonora na área de estudo, esta pode ser originada principalmente devido ao tráfego rodoviário, seguindo-se o tráfego aéreo e a combustão industrial.

II.4. O VAZADOURO CONTROLADO DE MATOSINHOS

Após o enquadramento geral da área de estudo é chegado o momento de descrever o principal objecto de estudo do presente trabalho, o VC de Matosinhos. O VC de Matosinhos foi escolhido devido à singularidade das suas características, quer em termos de contexto geológico de implantação, quer em termos de impermeabilização utilizada, a par de um contexto legal em constante evolução devido à crescente preocupação ambiental das entidades reguladoras ao longo dos anos.

Assim sendo, segue-se uma descrição do enquadramento legal que acompanhou a evolução daquilo que hoje em dia é o VC de Matosinhos e a descrição das suas características gerais.

II.4.1. ENQUADRAMENTO LEGAL

Em Portugal, o primeiro documento que abordou a gestão de resíduos foi o Decreto-Lei 13166, de 18 de Fevereiro de 1927, remetendo para as câmaras municipais o processo de remoção, despejo e tratamento de lixos, o que só veio a acontecer após a publicação do Decreto-Lei 31095, de 31 de Dezembro de 1940 (Antas, 1987). No entanto não havia controlo das situações e, de uma forma geral, os RSU apenas eram recolhidos nos maiores centros urbanos e depositados em lixeiras a céu aberto.

É neste contexto legal que se enquadra a antiga lixeira do Concelho de Matosinhos que deu lugar ao Vazadouro Controlado de Matosinhos. Entre os anos de 1974 e 1993 foi uma lixeira onde se depositavam a céu aberto, sem qualquer tipo de controlo ambiental, resíduos provenientes do Concelho de Matosinhos. Só a partir de 1993 este local passou a ser um sistema de deposição de RSU controlado e monitorizado, desenrolando-se a recuperação da antiga lixeira a par da construção do novo aterro, que viria a ser explorado pelo Município de Matosinhos.

Esta mudança surge após a criação da primeira Lei-Quadro dos Resíduos (Decreto-Lei 488/85, de 25 de Novembro), onde foram definidas de forma clara as

competências e as responsabilidades no domínio dos resíduos, quer a nível da administração central, quer a nível local. Desde então o regime jurídico de gestão de resíduos foi sofrendo alterações de forma a adaptar-se à evolução do direito comunitário.

A implementação do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU I), aprovado em 1997, seguindo a Directiva 75/442/CEE, modificou a gestão de RSU em Portugal, conduzindo à erradicação das lixeiras municipais, à criação de sistemas plurimunicipais de gestão de RSU, à construção de infra-estruturas adequadas para a valorização e eliminação de RSU, e à criação de sistemas de recolha selectiva multimaterial. Estes eram, à data, os principais objetivos que nortearam a implementação do PERSU I.

Apenas no ano de 2006 a antiga lixeira de Matosinhos é encerrada, deixando de receber qualquer tipo de resíduo, iniciando-se o processo que conduzirá à selagem e recuperação paisagística do local. O projecto de Encerramento, Selagem e Recuperação Paisagística do designado Aterro Sanitário (AS) de Matosinhos, inicia-se um ano após a publicação da nova Lei-Quadro dos Resíduos (Decreto-Lei 178/2006, de 5 de Setembro), tendo sido concluído em 2009.

Na segunda metade da década de noventa do século passado os municípios portugueses aderiram a sistemas de tratamento de RSU, ambientalmente mais correctos e mais eficazes, no entanto verifica-se que muitos dos sistemas, com taxas de deposição de resíduos muito elevadas, encontram-se com a sua capacidade de confinamento praticamente esgotada.

Para fazer face a esta situação, surge então o PERSU II, que consiste numa revisão ao PERSU I para o horizonte 2007-2016, onde é fortemente enfatizada a necessidade de se apostar na prevenção e redução da produção de RSU e no desvio dos resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) de aterro, colocando aos sistemas plurimunicipais metas a cumprir quer em termos de reciclagem e valorização de resíduos quer em termos de desvio de RUB de aterro (Portaria 187/2007, de 12 de Fevereiro). Estas medidas não chegaram a ser aplicadas ao caso do VC de Matosinhos, uma vez que o mesmo já se encontrava em fase de encerramento.

Actualmente, o regime geral da gestão de resíduos encontra-se estipulado no Decreto-Lei 73/2011, de 17 de Junho, que transpõe a Directiva 2008/98/CE.

A situação actual em que se encontra o VC de Matosinhos não é a ideal em termos ambientais, e se o seu encerramento fosse efectuado neste momento algumas situações teriam de ser revistas. No entanto, à luz da legislação em vigor na altura, as medidas adotadas foram consideradas suficientes e aceitáveis.

II.4.2. CARACTERIZAÇÃO GERAL

Actualmente são conhecidos diferentes tipos de tratamento/destino final a que os RSU podem ser submetidos: reutilização, reciclagem, valorização energética, compostagem ou valorização orgânica e confinamento em aterro. Conforme já foi referido a prevenção da produção de resíduos e o fomento da sua reutilização e reciclagem são estratégias fundamentais para a gestão de resíduos, correspondendo o aterro à alternativa menos desejável como destino final dos RSU, quer pela perda do valor potencial de alguns componentes depositados, quer pela ocupação de grandes áreas. No entanto, após o encerramento das lixeiras, a deposição em aterro tem sido, em Portugal, o destino mais frequente para os RSU.

O mesmo aconteceu no VC de Matosinhos onde, após o encerramento da lixeira existente, foi iniciada a construção de AS contíguo que passou a ser o destino final dos RSU produzidos no município. Ao longo de quase 20 anos diversos tipos de resíduos foram depositados de forma descontrolada na antiga lixeira de Matosinhos. Como a proveniência destes resíduos e a sua composição são desconhecidas, não é possível definir uma tipologia de resíduos específica para este local, embora se possa admitir que, na sua grande maioria, corresponderão a resíduos sólidos urbanos (RSU). No entanto, com a construção do AS contíguo à lixeira, novos resíduos foram depositados, agora de forma controlada, sendo estes RSU. São considerados RSU, os resíduos provenientes das habitações bem como outros resíduos que, pela sua natureza ou composição, sejam equiparáveis aos resíduos provenientes das habitações (Decreto-Lei 152/2002).

Assim sendo, o VC de Matosinhos é composto por duas áreas distintas: uma correspondente à antiga lixeira e outra correspondente ao AS (Fig. II.11). Uma vez que existe uma zona que não foi devidamente controlada não se pode designar toda a

estrutura como AS, por esse motivo, foi usada a designação de Vazadouro Controlado para englobar as duas zonas. Para ser designado de AS toda a área deveria corresponder a um local especialmente preparado para receber resíduos, devidamente impermeabilizado, com sistemas de recolha, tratamento e monitorização de efluentes líquidos e gasosos, onde os resíduos fossem depositados ordenadamente e cobertos com terra ou material similar, correctamente selado e com uma boa integração biofísica e paisagística.

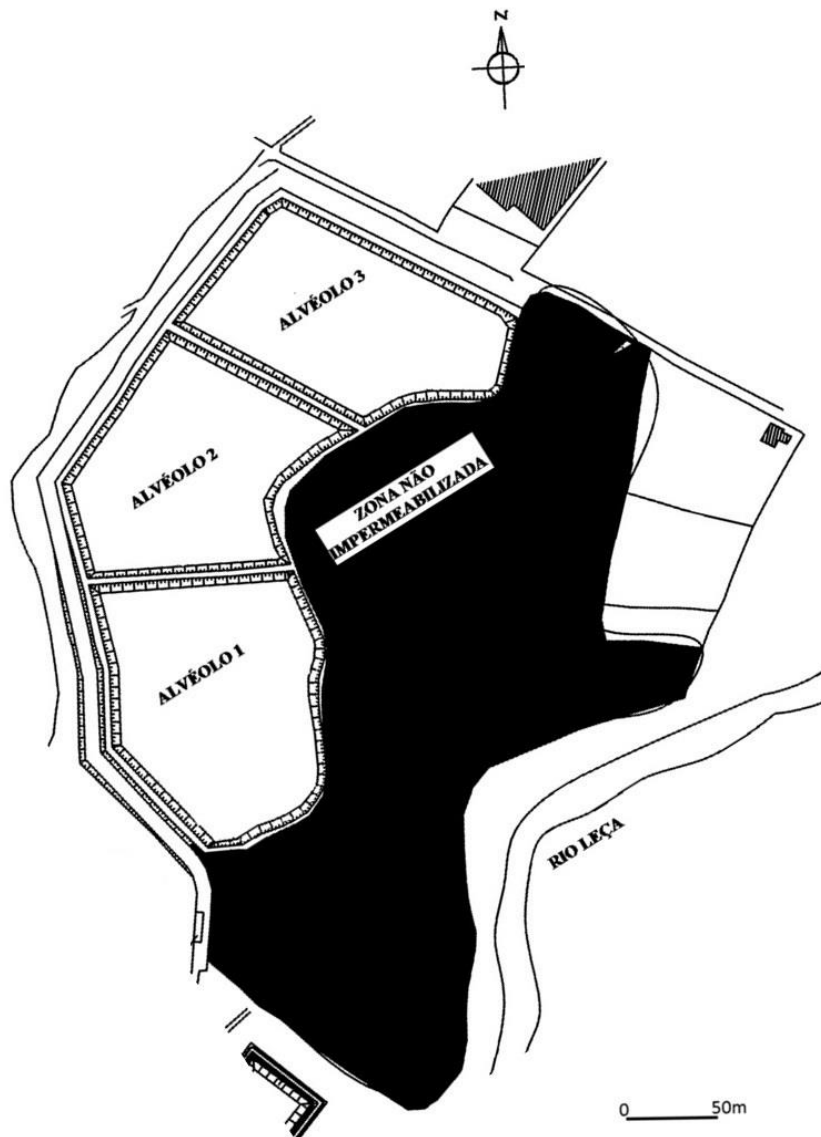


Figura II.11 – Duas áreas distintas no Vazadouro Controlado de Matosinhos: a branco - 3 alvéolos devidamente impermeabilizados; a preto - zona sem impermeabilização da base correspondente à antiga lixeira do município.

Segundo o Relatório do Projeto de Encerramento, Selagem e Recuperação Paisagística do Aterro Sanitário de Matosinhos (2007), os trabalhos de construção do

AS e de reabilitação da lixeira de Matosinhos foram desenvolvidos em simultâneo com a deposição de cerca de 200 toneladas de RSU por dia. A maioria dos resíduos antigos ficaram no mesmo local e os restantes foram transferidos para novos alvéolos, de acordo com um programa contemplando três fases:

1. Encerramento da maior e mais antiga célula de resíduos (lixeira);
2. Construção do AS constituído por: zona de apoio (edifício administrativo, oficina, edifício de controlo e parque de estacionamento), zona de deposição (3 novos alvéolos impermeabilizados), infra-estruturas de protecção ambiental (estação de tratamento de lixiviados, rede de drenagem de águas pluviais, rede de desgaseificação e sistema de queima de biogás) e infra-estruturas complementares (lava-rodas, vedação, zona de entrada);
3. Transferência de parte dos resíduos antigos para os alvéolos novos.

Para o encerramento da antiga lixeira, foi seguida a seguinte metodologia (Russo, 2005):

1. Remodelação e compactação dos resíduos;
2. Construção de um acesso ao topo da célula com agregado britado de granulometria extensa (ABGE) compactado;
3. Construção de uma parede moldada com espessura média de 0.4m assente no maciço rochoso a uma profundidade média de cerca de 5m, contornando o sopé da célula ao longo da margem direita do rio Leça;
4. Construção da drenagem de lixiviados no sopé dos taludes, que passa a encaminhar os lixiviados para uma lagoa de tratamento;
5. Instalação de uma rede para recolha de biogás no topo da lixeira constituída por poços e valas drenantes. A tubagem colectora principal está ligada a uma unidade de combustão do biogás;
6. Impermeabilização do topo e dos taludes utilizando uma camada de separação e protecção em geotêxtil de densidade 140g/m^2 sobre a qual foi instalada uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) de 1mm de espessura e outra manta de geotêxtil de protecção mecânica de densidade 140g/m^2 . Por fim, foi colocada uma camada de solos de cobertura com cerca de 1m, que serviu de suporte a um coberto vegetal.

No caso do AS, procedeu-se da seguinte forma (Russo, 2005):

1. Após a limpeza de cerca de 5 hectares de terreno, com a recolha dos resíduos dispersos no local e a demolição da casa do guarda da lixeira municipal, foi

- realizada a escavação, com cerca de 3m de profundidade, para os novos alvéolos;
2. Em todo o perímetro e zona central dos alvéolos, foi escavada uma vala para receber o dreno de lixiviados;
 3. Seguiu-se a execução da impermeabilização do fundo e dos taludes dos alvéolos, com a aplicação de um geotêxtil de densidade 140g/m^2 , sobre o qual foi colocada uma geomembrana de PEAD de 1.5mm, seguida de outra camada de geotêxtil de densidade 240g/m^2 . Sobre estas camadas foram executados os drenos de lixiviados constituídos por geodrenos de PEAD perfurados, envoltos em brita e protegidos por uma manta de geotêxtil de densidade 140g/m^2 para evitar a colmatação por finos;
 4. A construção da rede de drenagem de águas pluviais foi executada com recurso a meias canas de betão, caixas de visita e câmaras de perda de carga, nas banquetas constituídas por solo e ABGE compactado, com inclinação de 4% para o interior;
 5. O tratamento de todos os lixiviados foi efectuado por um sistema de lagunagem arejada, tendo sido construída para o efeito uma lagoa com a capacidade aproximada de 2000m^3 , dotada de arejamento por meio de 3 turbinas flutuantes com funcionamento programado para 16 horas por dia;
 6. Nos taludes de separação entre a célula velha e os novos alvéolos, foram colocados pneus velhos preenchidos com terra, formando favos, com função de protecção mecânica e diminuição do atrito dos resíduos com a geomembrana, evitando o seu rasgamento. Protegendo assim as telas dos choques do encosto de resíduos e compactação destes pelo equipamento utilizado.

De acordo com o Relatório do Projeto anteriormente citado, a selagem final do AS foi concebida e executada da seguinte forma:

1. Aplicação de camada de solos de regularização;
2. Utilização de geodreno para drenagem do biogás;
3. Aplicação de geomembrana de PEAD de 1.5mm;
4. Aplicação de geocomposto drenante (para águas pluviais);
5. Aplicação de geomalha de reforço de alta resistência à tracção nos taludes mais inclinados;
6. Aplicação de camada de solos de cobertura com uma espessura de cerca de 0.8m.

De acordo com a estratégia de intervenção paisagística e de revestimento vegetal, foi desenvolvido para o local um adequado projecto de valorização paisagística, com arborizações e arrelvamentos adequados (Fig. II.12).



Figura II.12 – Imagens actuais do VC de Matosinhos, após o encerramento e recuperação paisagística (A – zona sem impermeabilização da base; B - zona devidamente impermeabilizada).

Com base nestas informações, podemos afirmar que o principal problema relacionado com o VC de Matosinhos corresponde à zona da antiga lixeira onde a maioria dos resíduos foi deixada tal e qual, não tendo sido efectuado nenhum tipo de impermeabilização de base, o que potenciou, durante anos, que os lixiviados aí produzidos se infiltrassem no subsolo.

O estudo desenvolvido por Russo (2005), com o objectivo de aprofundar conhecimentos nos mecanismos de estabilização de resíduos de modo a contribuir para a identificação de problemas relacionados com a concepção, operação e encerramento do AS, alerta ainda para os seguintes factos:

1. A estabilização dos resíduos ocorrerá num período alargado superior a 60 anos, o que torna as exigências da legislação nacional e europeia insuficientes para acudir a eventuais incidentes pós-encerramento, para além de serem inadequadas por restringir o fluxo de água no interior da massa de resíduos, potenciando a mumificação dos resíduos, em vez de o transformar em aterro bioreactor;

2. Os lixiviados têm uma composição química muito complexa e apresentam uma variabilidade que dificulta o seu tratamento. O sistema de tratamento dos lixiviados revelou-se insuficiente, por não atingir os valores aceitáveis relativos aos parâmetros estabelecidos para as descargas de efluentes em meio hídrico;
3. A produção de biogás é elevada e com altos teores de metano;
4. O conhecimento dos mecanismos de degradação dos resíduos e da formação de lixiviados e biogás é de fundamental importância para a avaliação global da eficiência de tratamento de um aterro sanitário, permitindo a identificação de esquemas adequados de protecção ambiental para prevenir potenciais contaminações do solo, ar e água.

Mediante estas observações, efectuadas no decurso da requalificação ambiental da lixeira de Matosinhos, será então necessário um estudo que permita detectar se o encerramento desta lixeira foi efectuado de forma correcta, sem prejuízo para as populações e ecossistemas envolventes.

Assim sendo, como forma de detectar o estado actual em que se encontra a envolvente ao Vazadouro Controlado de Matosinhos, surge o presente estudo que, com o recurso às metodologias descritas no próximo capítulo, pretende avaliar as consequências ambientais da existência desta massa de resíduos, nos solos e águas da região.



CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

III.1. PROSPEÇÃO GEOFÍSICA

Os métodos geofísicos são uma forma não invasiva de obter informações sobre as condições geológicas dos terrenos. São técnicas indirectas que se baseiam na variação das propriedades físicas dos materiais geológicos (densidade, condutividade eléctrica, resistividade, velocidade de propagação das ondas sísmicas, entre outros) em função da sua mineralogia, do grau de alteração, da fracturação, da porosidade, da salinidade entre outros factores.

A interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre as características litológicas, estruturais e hidrogeológicas do terreno.

Os métodos geofísicos podem englobar-se em dois grandes grupos: passivos e activos (Telford et al., 1990; Burger, 2006).

Métodos Passivos – consistem na medição de campos ou propriedades naturais do terreno. Estes métodos subdividem-se em:

- Gravimétricos – medem as variações do campo gravitacional terrestre no local em estudo, cuja variação depende da propriedade densidade;
- Magnéticos – medem as variações do campo magnético da terra impressas no local em estudo, cuja variação depende da propriedade susceptibilidade magnética;
- Radiométricos – medem as propriedades radioactivas do terreno em estudo, nomeadamente da emissão gama.

Métodos Activos – consistem na medição da resposta do terreno, a um determinado sinal que lhe é introduzido. Estes métodos subdividem-se em:

- Eléctricos – incluem os métodos da resistividade, da polarização induzida, eletromagnético indutivo e georadar, cada um baseado nas diferentes propriedades eléctricas e características do terreno em estudo (nomeadamente resistividade, cargabilidade,...);
- Sísmicos – incluem os métodos de reflexão e refacção que se baseiam na emissão de ondas sísmicas artificiais que, após percorrerem determinada distância no interior do terreno em estudo, são reflectidas e refractadas e retornam à superfície.

No entanto existem métodos eléctricos (ex: potencial espontâneo) e sísmicos (ex: sísmica passiva) que se podem incluir nos métodos passivos.

Os métodos geofísicos normalmente mais utilizados em estudos hidrogeológicos e ambientais são os métodos eléctricos: resistividade eléctrica, electromagnético indutivo, georadar, polarização induzida e potencial espontâneo, sendo por vezes complementados com a utilização de métodos sísmicos e gravimétricos consoante o objectivo final.

Estes métodos geofísicos devido ao seu baixo custo e por não alterarem os locais investigados, ao contrário dos métodos invasivos (escavações, perfurações) que podem potenciar a contaminação, são adequados para uma caracterização preliminar de áreas suspeitas de contaminação por RSU, com vista à orientação de estudos posteriores mais onerosos, detalhados e focalizados (amostragem de água e solos). Além disso, os levantamentos geofísicos permitem a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão de variações laterais resultantes das mudanças litológicas ou originadas pela presença localizada da contaminação subterrânea.

Na realização de estudos ambientais em áreas contaminadas, a execução de levantamentos geofísicos tem como objectivo principal a identificação de contaminação subterrânea, a par da definição das características geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados. As características geológicas são de especial importância neste tipo de estudos uma vez que podem condicionar o comportamento dos contaminantes em profundidade.

Segundo Benson et al., 1983, as investigações em locais de deposição de resíduos requerem uma abordagem integrada e faseada, envolvendo:

1. Avaliação preliminar do local, recorrendo a fotografia aérea, visitas ao local, informações disponíveis sobre os limites do local e zonas de concentração dos resíduos bem como sobre a geologia local provável;
2. Levantamentos geofísicos para identificar resíduos enterrados, estimar as quantidades e delinear plumas de contaminantes nas águas subterrâneas;
3. Confirmação da contaminação das águas subterrâneas através de poços de monitorização projectados na base das plumas e confirmação da estratigrafia do subsolo definida pelos levantamentos geofísicos.

III.1.1. SELEÇÃO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

A consulta prévia da bibliografia permite ter uma indicação dos métodos geofísicos mais apropriados (ex.: Greenhouse et al., 1989; Green et al., 1999). Contudo, só após a avaliação preliminar do local e tendo em conta os objectivos a atingir, foi possível ter uma ideia de quais os métodos geofísicos mais indicados para o estudo da contaminação associada à deposição de RSU no VC de Matosinhos.

A situação ideal seria experimentar os diversos métodos no local e depois compará-los para avaliar com certeza absoluta quais os mais indicados. Mas tal não é possível pois implicaria dispêndio de tempo e custos muito elevados, nomeadamente com a aquisição/aluguer de equipamentos que não estavam disponíveis no momento de recolha dos dados de campo.

Para a escolha do método mais adequado para o estudo da contaminação associada à deposição de RSU no VC de Matosinhos foi então efectuada uma análise geral dos métodos geofísicos existentes dando especial atenção à sua aplicabilidade a estudos ambientais e à possibilidade de serem executados na área de estudo. Foram considerados aspectos relacionados com a aplicabilidade dos métodos, disponibilidade do equipamento, recursos humanos necessários, espaço disponível no local de estudo, interferências na superfície e na subsuperfície do local, tipo de resolução pretendido, profundidade a atingir e contraste entre os materiais.

Assim sendo, com vista à identificação de plumas de contaminação na área de estudo optou-se pela utilização do método da resistividade eléctrica, através da técnica de resistividade eléctrica tomográfica, e do método electromagnético, sob a forma de técnicas indutivas electromagnéticas. Para complementar as questões relacionadas com a caracterização geológica e mecânica em profundidade escolheu-se o método da refacção sísmica.

O método da resistividade eléctrica (RE) e o método electromagnético indutivo (EM) foram escolhidos devido à sua aplicabilidade na definição de plumas de contaminação associadas a depósitos de resíduos (Benson et al., 1983). A presença de contaminantes num determinado local produz uma alteração nos valores de condutividade/resistividade característicos de determinado local, que podem ser detectados recorrendo aos métodos electromagnético e da resistividade eléctrica. Os

equipamentos utilizados no método EM conferem uma maior mobilidade ao operador aquando da aquisição de dados, comparativamente com o método da RE onde é necessário o contacto de eléctrodos com o solo. Este facto juntamente com a rápida aquisição de dados que se consegue no método EM permite cobrir grandes áreas, característica vantajosa quando se pretende fazer uma avaliação preliminar de determinado local. Tanto o método EM como RE permitem detectar e delimitar a pluma de contaminação e eventualmente o seu fluxo (Benson et al., 1983). No entanto o método da RE torna-se mais vantajoso pois permite obter informações com maior resolução, ao passo que o método EM oferece, na sua forma primária, informações para gamas de profundidade estimadas, que variam consoante a frequência do equipamento utilizado, bem como do meio geológico. Desta forma o método da RE torna-se mais fiável pois o número de dados obtidos em determinado perfil é maior e consequentemente o erro associado à interpolação dos dados será menor. Uma outra desvantagem do método EM relativamente ao da RE é o facto de o primeiro ser mais susceptível a interferências nas medições quando na presença de elementos metálicos nas imediações, como é o caso de vedações metálicas, arame farpado, cabos, postes de iluminação, caixas metálicas enterradas, etc. ou quando na presença de ruído electromagnético provocado por linhas de alta tensão (Benson et al., 1983). No método da RE também é possível estimar a profundidade do nível freático, a profundidade, espessura e resistividade das diferentes camadas eléctricas existentes em profundidade, dando assim indicação sobre os diferentes níveis geológicos. Com o método da RE também é possível estimar a profundidade de aterros ou outros locais de deposição de resíduos. Devido à grande versatilidade do método da RE, conferida pelos diferentes arranjos que é possível aplicar para aquisição de dados, podemos variar as diferentes configurações de eléctrodos, consoante as necessidades de investigação se focalizem mais na resolução superficial, na profundidade de investigação, ou até na variação lateral de resistividade. Em ambos os métodos, as leituras produzem resultados em unidades de condutividade/resistividade, possibilitando o uso directo dos dados de campo e permitindo uma correlação com os valores de condutividade de amostras de solo e de água subterrânea.

Por outro lado, o método da refacção sísmica (SR, *seismic refraction*) foi seleccionado por permitir a determinação de valores indicativos da espessura de alteração e de certa forma das profundidades dos diferentes níveis geotécnicos presentes no local de estudo. Através do cálculo da velocidade de propagação das ondas sísmicas no interior das camadas, grandeza directamente relacionada com as propriedades

mecânicas dos solos e rochas, pode ainda ser estimada a competência mecânica dos materiais atravessados pelas ondas sísmicas, estimar a profundidade de aterros ou estudar novos locais para deposição adequada de resíduos.

Outros métodos poderiam ser utilizados para caracterizar a contaminação no VC de Matosinhos, como por exemplo o georadar (GPR, *ground-penetrating radar*). No entanto o GPR é um método menos eficaz e menos usado para este tipo de objectivo do que os métodos RE e EM, o que não significa que não possa ser usado como um método complementar. O GPR é um método de elevada resolução muito utilizado na identificação de tubagens, galerias e objectos enterrados e na investigação de resíduos orgânicos, contudo a profundidade de investigação é pequena no caso de estarmos na presença de meios muito condutivos. No caso da aplicação do GPR ao VC de Matosinhos, esta só seria vantajosa se o equipamento utilizado tivesse a capacidade para atingir profundidades na mesma ordem de grandeza das obtidas através do método RE.

Recentemente, os métodos gravimétricos, que se baseiam nos contrastes de densidade existentes entre o objecto de estudo e o meio envolvente, têm sido aplicados em aterros (Mantlik et al. 2009). No entanto, devido à sua natureza, o método não é apropriado para a identificação de plumas de contaminantes, motivo pelo qual não foi escolhido para o principal objectivo de estudo do VC de Matosinhos. Além disso, a morosidade envolvida na aplicação deste método pode ser também um factor limitativo para a utilização da gravimetria neste tipo de problemas. Ainda assim, como a densidade dos resíduos é diferente do meio onde estes se encontram, existe a possibilidade do seu uso em aterros, nomeadamente na definição da morfologia da base do aterro. Devido ao zonamento interno que os aterros possuem, estes métodos podem ser usados para identificar mudanças de densidade no seu interior, que podem ter importância designadamente para a produção de biogás (Bernstone et al., 2000). Contudo, para uma interpretação significativa baseada em dados gravimétricos, estes terão de ser modelados com a ajuda de dados de resistividade ou sondagens mecânicas (Mantlik et al. 2009).

A utilização do método da polarização induzida (IP, *induced polarization*) também foi equacionada, no entanto este método apresenta algumas limitações em relação ao método da RE quando aplicado a estudos de caracterização de áreas contaminadas por depósitos de resíduos (Moreira & Braga, 2009a). A aquisição de dados de IP é

muito mais demorada do que a aquisição de dados de RE e a sua utilização é mais indicada em casos em que se suspeita a presença de materiais polarizáveis. O método IP é mais adequado para prospecção de minerais metálicos condutores ou para estudos de contaminação em ambientes sedimentares onde se pretende distinguir quais os valores de cargabilidade elevada que se referem a áreas contaminadas e quais os que se referem à presença de formações com elevado conteúdo de argila (Martinho & Almeida, 2006), que não é o caso da área de estudo do presente trabalho. Por outro lado, a aplicação do método de IP em aterros de resíduos sólidos traduz uma representação subestimada das reais dimensões da área contaminada (Moreira & Braga, 2009b). A cargabilidade tende a aumentar com o crescimento da concentração de sais, mas a partir de uma determinada concentração o comportamento inverte-se, e os valores de cargabilidade tendem a ser muito baixos (Elis, 2000), podendo conduzir a uma interpretação errada sobre a existência/não existência de contaminação. Motivo pelo qual este método não deve ser aplicado isoladamente mas sim com o método da resistividade, ou outro, que permita esclarecer dúvidas de interpretação dos dados de cargabilidade.

O método do potencial espontâneo (SP, *self potencial*) é um método mais direccionado para a prospecção mineral. No caso de estudos ambientais aplica-se especialmente na identificação de fluxos de águas subterrâneas. Embora seja possível a interpretação quantitativa do SP para que forneça taxas e profundidades dos fluxos, geralmente a qualidade e precisão dos mesmos não permitem esta quantificação, ficando a interpretação fundamental restrita ao mapeamento dos fluxos em planta (Gallas, 2005). Na maioria das vezes, especialmente em zonas urbanas, só é possível uma interpretação qualitativa, devido ao elevado nível de ruído e à insuficiência na amostragem de dados. Por outro lado, em estudos ambientais a intensidade das anomalias detectadas por este método é menor do que no caso de mineralizações, o que limita a sua aplicação sendo necessário utilizar métodos complementares como RE ou IP para uma interpretação adequada.

III.1.2. MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO INDUTIVO

III.1.2.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS

Os princípios fundamentais do electromagnetismo baseiam-se nas equações de Maxwell. Maxwell (1873) sintetizou as leis empíricas de Ampère e de Faraday,

generalizando-as em função da posição e do tempo constituindo a “Teoria Electromagnética”. Com essa teoria demonstrou que todos os fenómenos eléctricos e magnéticos poderiam ser descritos com base em apenas quatro equações (Eq. III.1, III.2, III.3, III.4). O campo electromagnético caracteriza-se por quatro funções vectoriais dependentes da posição no espaço e do tempo: o campo eléctrico E , a densidade de fluxo eléctrico D , o campo magnético H , e a densidade de fluxo magnético B .

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{Eq. III.1})$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{Eq. III.2})$$

$$\nabla \times H = J + \partial D / \partial t \quad (\text{Eq. III.3})$$

$$\nabla \times E = - \partial B / \partial t \quad (\text{Eq. III.4})$$

A equação III.1, Lei de Gauss para a eletricidade, surge da Lei de Coulomb e relaciona o campo eléctrico e as suas fontes, as cargas eléctricas (ρ =densidade de carga eléctrica). A equação III.2, Lei de Gauss para o magnetismo é o equivalente à equação III.1 mas para campos magnéticos, na ausência de polos magnéticos livres. A equação III.3 é a Lei de Ampère corrigida por Maxwell, descreve a relação entre um campo magnético e a corrente eléctrica (J) que o origina, e estabelece que um campo magnético é sempre produzido por uma corrente eléctrica ou por um campo eléctrico variável. A última equação (Eq. III.4) é a Lei de Faraday que descreve o fenómeno da indução eletromagnética. Esta equação explica que o campo eléctrico é produzido pela variação do fluxo magnético, desse modo, um campo magnético alternado oscilando com determinada frequência induz uma corrente também alternada e com a mesma frequência num meio condutor (Telford et al., 1990). Este fenómeno é a base para a aplicação do método geofísico eletromagnético.

O método electromagnético permite medir a capacidade que os materiais têm de facilitar o fluxo de corrente eléctrica, propriedade física designada por condutividade. A unidade de condutividade no Sistema Internacional (SI) é Siemens por metro (S/m).

No método electromagnético utiliza-se uma fonte para gerar um sinal que excita o terreno. O sinal a medir é o resultado da sobreposição do sinal da fonte e da resposta do terreno. A fonte, ou transmissor (Tx), é geralmente constituída por uma bobine onde se faz passar uma corrente eléctrica variável (alternada) com uma frequência da ordem de alguns kHz. O receptor (Rx), também formado por uma bobine, é colocado a uma distância relativamente pequena do transmissor (McNeill, 1980b).

O campo magnético variável, designado por campo primário H_p , gerado pela corrente alterna no transmissor induz correntes eléctricas (C_e) no terreno localizado na vizinhança. As linhas de corrente são circulares e perpendiculares à disposição da bobine (Fig. III.1).

A intensidade destas correntes é proporcional à condutividade do terreno. Como são correntes variáveis geram um campo magnético proporcional à intensidade de corrente, designado por magnético secundário H_s , que é detectado, sob a forma de uma diferença de potencial, conjuntamente com o campo primário, H_p , pelo receptor Rx. O campo magnético secundário depende da frequência da corrente em Tx, da distância entre Tx e Rx, e da distribuição da condutividade eléctrica no terreno (McNeill, 1980b).

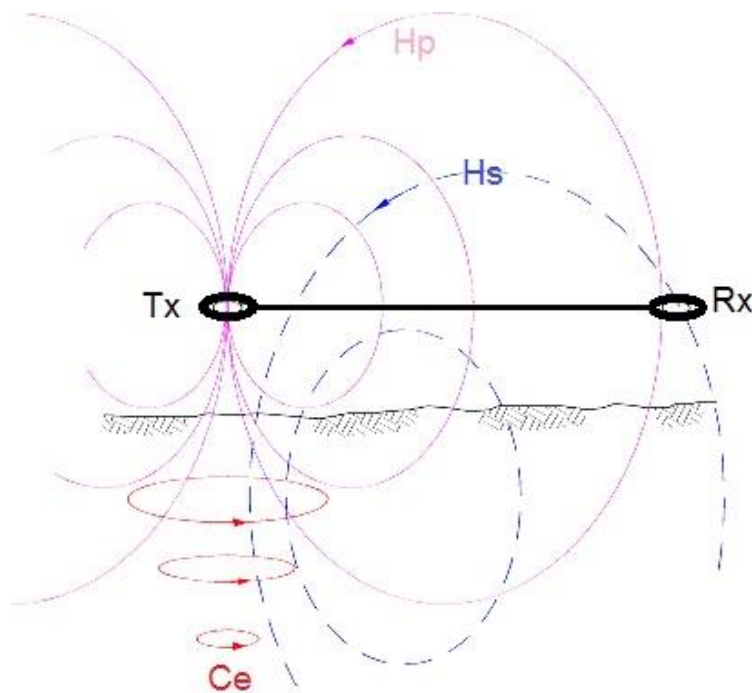


Figura III.1 – Ilustração do princípio de funcionamento do método electromagnético (Tx: bobine transmissora; Rx: bobine receptora; H_p : campo magnético primário; H_s : campo magnético secundário; C_e – correntes eléctricas induzidas) (adaptado de NGA, 2011).

De acordo com certas condições definidas na teoria de operação a baixos valores de indução, descrita por McNeill (1980b), a razão entre H_s e H_p é linearmente proporcional à condutividade do terreno, facto que permite uma leitura directa dos valores de condutividade aparente do terreno através da seguinte equação (Eq. III.5):

$$\sigma_a = (4/\omega\mu_0s^2) \cdot (H_s/H_p) \quad (\text{Eq. III.5})$$

Onde:

σ_a = condutividade aparente (mS/m)

$\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência (Hz)

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo

s = espaçamento entre as bobines (m)

H_s = campo magnético secundário na bobine receptora

H_p = campo magnético primário na bobine receptora

Quando se fazem medições utilizando bobines, são possíveis os arranjos entre Tx e Rx conforme observável na figura III.2. No caso de as bobines estarem dispostas na horizontal, dipolo vertical, a profundidade de investigação é maior do que no caso de as bobines estarem dispostas na vertical, dipolo horizontal (McNeill, 1980b).

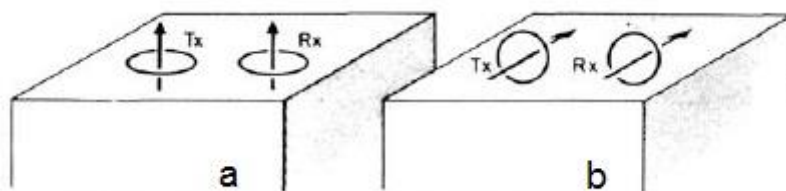


Figura III.2 – Arranjos entre as bobines, no método electromagnético: a – dipolo vertical, bobine horizontal; b – dipolo horizontal, bobine vertical (McNeill, 1980b).

A profundidade de investigação dependerá, então, da condutividade do terreno, da frequência usada, da distância entre transmissor e receptor e do tipo de arranjo entre bobines.

A presença de contaminantes inorgânicos produz um aumento na concentração de iões no solo e águas subterrâneas, aumentando os valores de condutividade característicos de um determinado local. Este aumento permite a identificação de solos e águas subterrâneas contaminadas em locais de deposição de resíduos (Benson et al., 1983). As variações laterais e verticais de condutividade observadas vão permitir encontrar condições anómalas, possivelmente associadas a plumas de contaminação. A cartografia de uma pluma de contaminação vai permitir a definição do fluxo local de contaminantes e das taxas de migração de contaminantes, se forem efectuadas medidas de condutividade espaçadas no tempo (Benson et al., 1983).

A condutividade é o inverso da resistividade o que permite que as informações obtidas através do método EM sejam um complemento das informações obtidas pelo método da RE. A complementaridade destes dois métodos torna-se vantajosa na medida em que permite confirmar a localização de anomalias e, do ponto de vista prático, poupar

tempo e custos pois, numa primeira fase, pode ser feita uma campanha de prospecção geofísica com o método EM, fazendo uma cobertura geral do terreno, seguida de perfis de RE para confirmar e delimitar as zonas contaminadas com maior resolução horizontal e vertical.

III.1.2.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

Para uma cobertura geral da área de estudo com o método EM optou-se pela criação de uma malha inicial equitativamente dispersa, mas alterável de acordo com as condições do local. Após a identificação de zonas anómalas pelo método EM passar-se-ia para o método da RE para um estudo mais aprofundado desses locais.

Para a obtenção dos dados de condutividade utilizou-se, numa primeira fase, o equipamento EM-31 (Fig. III.3a). Para a utilização deste equipamento um operador é suficiente, e faz medições sem necessidade de eléctrodos nem de contacto com o terreno o que permite um levantamento de dados mais rápido que, associado à precisão com que detecta pequenas variações de condutividade, o torna um método muito vantajoso. A principal desvantagem deste método está relacionada com as medições em zonas próximas de materiais condutores, tais como vedações, postes de electricidade, veículos, que podem levar a interpretações erradas dos valores de condutividade se a sua presença não for devidamente assinalada e interpretada. Outra desvantagem, relativamente ao método da resistividade eléctrica, é a de possibilitar a medição de apenas duas pseudo profundidades específicas (3m e 6m).

Posteriormente, aquando da deslocação ao local, identificaram-se algumas estruturas metálicas que poderiam interferir com o campo magnético medido através deste método (vedações metálicas, arame farpado, cabos, postes de iluminação, caixas metálicas enterradas). Assim sendo, decidiu-se fazer um teste com o equipamento EM-31 (*Geonics Limited*), efectuando um perfil de 80m com afastamento de 2.5m entre medições, perfil EMt (Fig. III.3d). Como em termos de profundidade este equipamento só nos permitia uma análise muito superficial do terreno (até aproximadamente 6m) utilizou-se também um equipamento, semelhante ao EM-34, designado por FDEM-8 (Fig. III.3b,c) que permite atingir maior profundidade de investigação (na ordem dos 64m).

Com o equipamento FDEM-8 (*Frequency Domain Electromagnetic Equipment, DT Barlow*) foram realizadas medições ao longo de cinco perfis, com espaçamento de 5m entre medições e 10m entre bobines. Os perfis têm a extensão de 185m (perfil EM1), 40m (perfis EM2 e EM3), 50m (perfil EM4) e 75m (perfil EM5) e estão dispostos conforme a Fig. III.3d. O transmissor é controlado pelo receptor, que, por sua vez, serve como o sistema de aquisição de dados. Os dados são guardados no receptor para posterior transferência para um computador. Em cada ponto de medição ao longo do perfil, em poucos segundos, o sistema percorre oito frequências (37, 75, 150, 300, 600, 1200, 2400 e 4800 Hz), medindo as componentes amplitude e fase em cada local. Cada frequência fornece informações cobrindo uma profundidade diferente em cada local de medição, sendo possível obter dados para oito pseudo profundidades específicas (8m, 16m, 24m, 32m, 40m, 48m, 56m, 64m). Os dados podem ser obtidos em formato ASCII ou directamente em ficheiros “.DAT” para interpolação direta no *software* SURFER, onde os dados são modelados para posterior interpretação.



Figura III.3 – Método EM: a – EM-31; b - FDEM-8, transmissor; c - FDEM-8, receptor; d- localização dos perfis realizados.

Como já foi referido, parte dos dados obtidos por este equipamento são medidos em valores de amplitude que estão relacionados, de forma proporcional, com os valores de condutividade do terreno. Assim para valores superiores de amplitude correspondem valores superiores de condutividade e vice-versa.

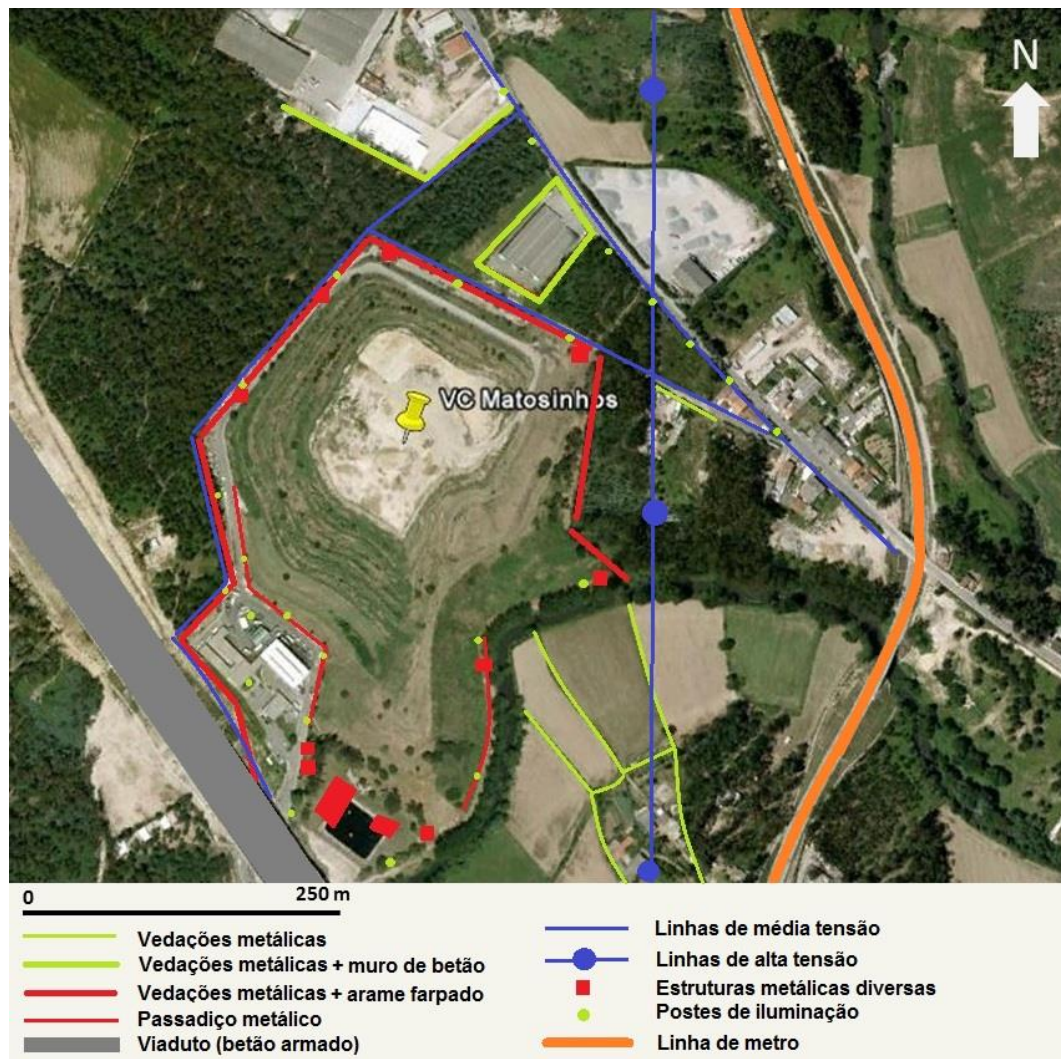


Figura III.4 – Levantamento de obstáculos metálicos existentes na área de estudo.

Porém, verificou-se alguma interferência entre os objectos metálicos referidos, bem como algum ruído, o que juntamente com a impossibilidade de converter esses valores de amplitude em condutividade conduziu a uma mudança de estratégia no que diz respeito aos levantamentos geofísicos. Assim sendo, procedeu-se à realização de um maior número de perfis de resistividade eléctrica do que o inicialmente previsto de forma a cobrir a área de estudo. Isto porque com os valores obtidos pelo equipamento FDEM-8 apenas teríamos uma avaliação qualitativa da área de estudo, com algumas distorções, e, como tal, a sua comparação com outro tipo de dados, nomeadamente

dados de análises de água, não seria possível. O levantamento dos obstáculos metálicos existentes na área de estudo (Fig. III.4) permitiu verificar que o método EM não seria o mais adequado para utilizar neste estudo uma vez que existem diversas estruturas metálicas que poderiam criar interferências nas leituras efectuadas.

III.1.3. MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

III.1.3.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS

Em 1827, Ohm formulou uma lei que permite calcular a resistência eléctrica (R) de um condutor através da razão entre a diferença de potencial (ΔV) aplicada aos terminais do condutor e a intensidade de corrente (I) que o percorre (Eq. III.6):

$$R = \Delta V / I \quad (\text{Eq. III.6})$$

De acordo com a segunda lei de Ohm, podemos também definir a resistência eléctrica (R) de um condutor com base nos factores que a influenciam, resistividade do material (ρ) e forma geométrica do condutor. No caso de um condutor homogéneo de forma cilíndrica a resistência é dada pela equação III.7, onde L é o comprimento e S a secção transversal do condutor:

$$R = \rho L / S \quad (\text{Eq. III.7})$$

Mas, no terreno, a corrente eléctrica não flui por um único caminho, conforme no caso do condutor referido. Se considerarmos um único eléctrodo a injectar corrente na superfície de um meio de resistividade uniforme (com circuito fechado a uma grande distância do eléctrodo), a corrente flui de forma radial a partir do ponto de injeção de corrente e as superfícies equipotenciais daí decorrentes são perpendiculares ao fluxo de corrente formando semiesferas (Fig. III.5). Considerando uma semiesfera de raio r e superfície $2\pi r^2$ no semi-espaco homogéneo, aplicando a equação III.7 teremos:

$$R = \rho r / 2\pi r^2 = \rho / 2\pi r \quad (\text{Eq. III.8})$$

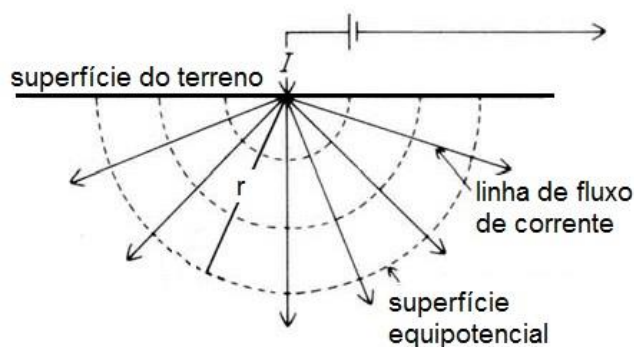


Figura III.5 – Fluxo de corrente eléctrica no terreno (I – intensidade de corrente eléctrica injectada no terreno; r – raio da semiesfera considerada).

Igualando as equações III.6 e III.8 obteremos:

$$\begin{aligned}\rho / 2\pi r &= \Delta V / I \\ \rho &= 2\pi r \Delta V / I \quad (\text{Eq. III.9})\end{aligned}$$

Esta equação (Eq. III.9) é fundamental para a aplicação do método geofísico da resistividade eléctrica e permite calcular o valor da resistividade (ρ) de um determinado material, em Ohm. metro ($\Omega.m$).

Considerando agora o caso em que o outro eléctrodo de injeção de corrente está a uma distância finita da fonte, podemos então descrever o princípio do método da resistividade eléctrica.

O método da resistividade eléctrica utiliza uma fonte de corrente contínua, que é injectada no terreno através de dois eléctrodos, eléctrodos de injeção (denominados A e B), com o objectivo de medir a diferença de potencial entre outros dois eléctrodos, eléctrodos de leitura ou potencial (denominados M e N), o que permite calcular a resistividade aparente, para um determinado volume de solo atravessado pelo campo eléctrico (Fig. III.6).

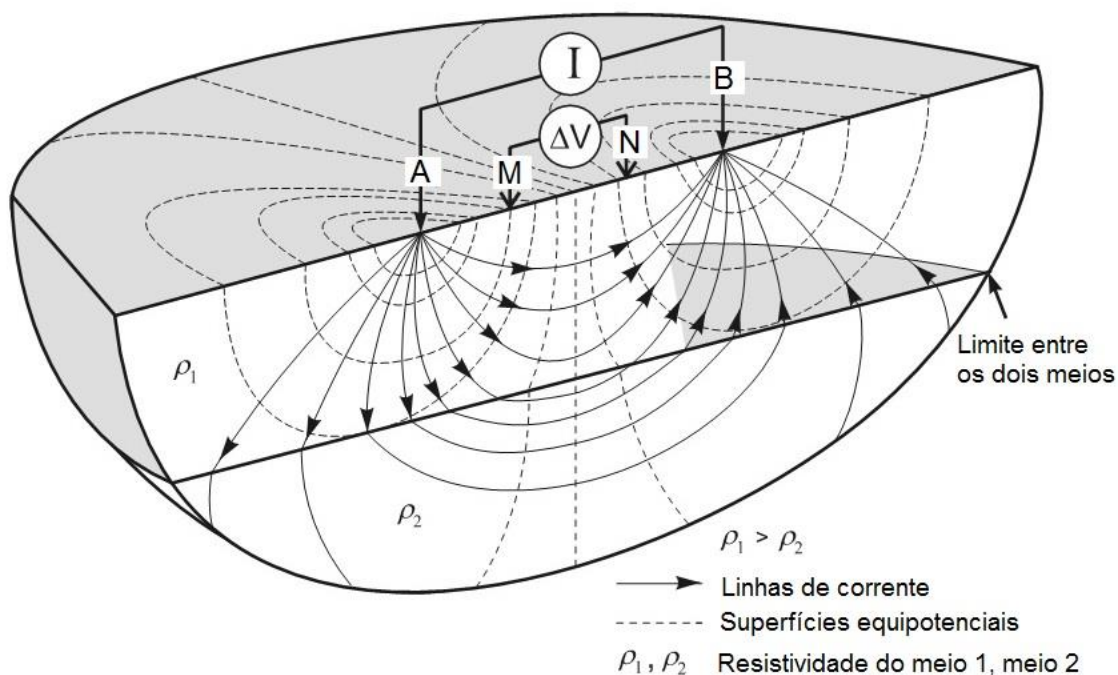


Figura III.6 – Modelo esquemático do método da resistividade eléctrica (adaptado de Knodel et al., 2007).

Os valores obtidos numa campanha de prospecção geofísica pelo método da resistividade eléctrica são valores, não da resistividade real mas sim da resistividade aparente, dado que os terrenos são meios não homogéneos, que influenciam de modo heterogéneo o campo eléctrico gerado pela circulação da corrente eléctrica (Telford et al., 1990).

Assim sendo, a resistividade aparente (ρ_a) será dada pela seguinte equação:

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (\text{Eq. III.10})$$

Onde, $K = 2\pi (1/AM - 1/NA - 1/BM + 1/BN)^{-1}$

AM, AN, BM e BN são respectivamente as distâncias entre: eléctrodo de corrente A e eléctrodo de potencial M, eléctrodo de corrente A e eléctrodo de potencial N, eléctrodo de corrente B e eléctrodo de potencial M, eléctrodo de corrente B e eléctrodo de potencial N.

Existem diversas configurações geométricas de eléctrodos que podem ser utilizadas nesta metodologia, sendo que as mais usuais são as de Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo (Fig. III.7). A variedade de arranjos que é possível estabelecer com o método da resistividade eléctrica confere uma versatilidade muito grande a esta metodologia. Possibilita variar entre as diferentes configurações de eléctrodos, consoante as necessidades de investigação se focalizem mais na resolução superficial, na profundidade de investigação, ou na variação lateral de resistividade.

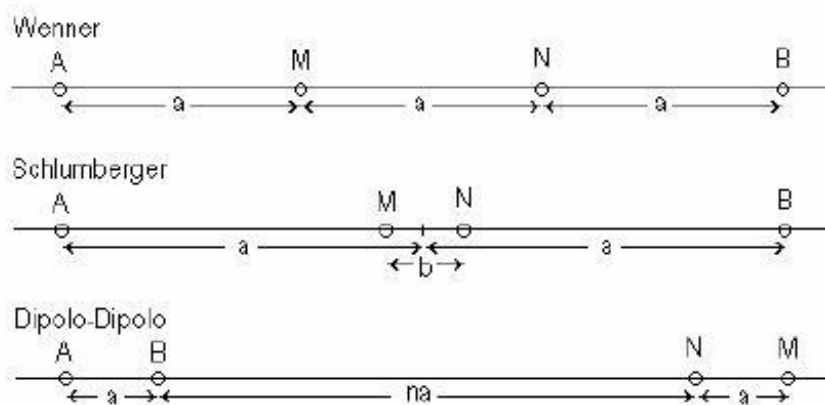


Figura III.7 – Diferentes configurações de eléctrodos utilizadas no método da resistividade eléctrica.

No dispositivo de Wenner (Fig. III.7) todos os eléctrodos estão separados pela mesma distância. Variando a distância 'a' e mantendo o mesmo ponto central obtém-se uma sondagem eléctrica. Ao realizar um conjunto de sondagens eléctricas, lateralmente

separadas, e sobre o mesmo perfil, obtém-se uma “secção” bidimensional que traduz a variação da resistividade do terreno em termos laterais e em profundidade, obtendo-se, por simples atribuição geométrica em posição e profundidade, uma pseudo-secção de resistividade aparente (Sharma, 1997).

No dispositivo de Schlumberger (Fig. III.7) os eléctrodos A, B, M e N são colineares e dispostos simetricamente em relação a um ponto central. No caso do dispositivo Dipolo-Dipolo (Fig. III.7), os eléctrodos M e N estão distantes de A e B. Se a distância entre o ponto central de A e B for grande, comparativamente com a distância entre eléctrodos, o campo eléctrico, gerado pela injeção em A e B, aproxima-se do campo gerado por um dipolo eléctrico que será muito sensível às variações da resistividade do meio (Sharma, 1997). Do mesmo modo, como foi descrito para a metodologia Wenner, é possível obter pseudo-secções de resistividade aparente com estes dois dispositivos tetraelectródicos, através da realização de um conjunto de sondagens dispostas lateralmente ao longo do mesmo perfil (Sharma, 1997).

Na figura III.8 mostra-se um exemplo de uma construção de uma pseudo-secção com base na combinação dos arranjos Wenner-Schlumberger. No exemplo (Fig. III.8) é possível ver que a primeira leitura é efetuada com o arranjo Wenner e a décima oitava leitura é efetuada com o arranjo Schlumberger.

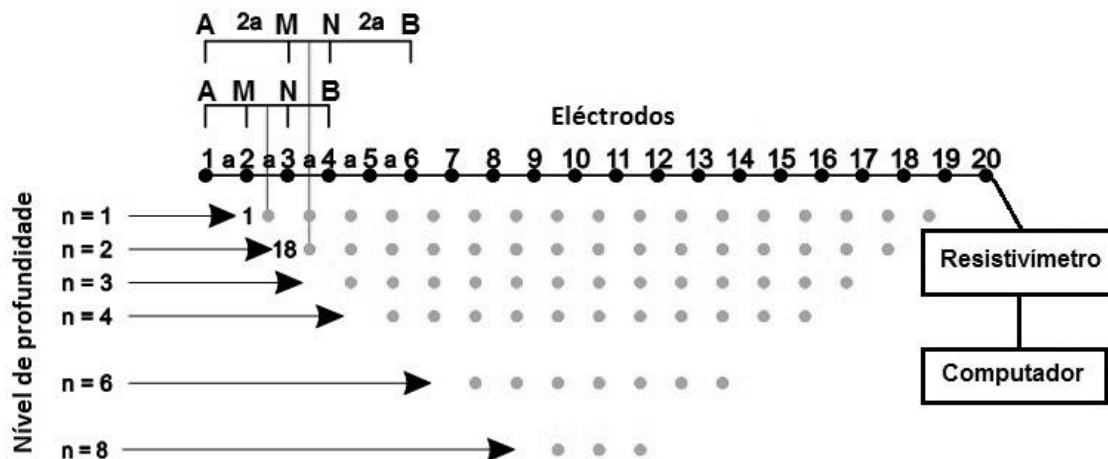


Figura III.8 – Construção de uma pseudo-secção de resistividade com o dispositivo Wenner-Schlumberger
(Adaptado de Neymadpour, 2010).

A profundidade de investigação, atingida por cada método, depende do meio que a corrente atravessa mas também depende da distância entre os eléctrodos. Quanto menor o espaçamento entre eléctrodos, maior será o detalhe da informação, embora a

profundidade de investigação seja menor. Quanto maior for a distância entre os eléctrodos maiores profundidades poderão ser investigadas, embora com menor detalhe. Por este motivo a escolha do dispositivo a utilizar é um critério importante para a realização de uma campanha de prospecção geofísica eléctrica que resulte para os objetivos previamente traçados.

Para a interpretação dos resultados obtidos numa campanha geofísica pelo método da resistividade eléctrica é necessário ter um conhecimento das propriedades eléctricas dos materiais em estudo, especialmente da sua resistividade característica. A resistividade eléctrica dos terrenos é uma característica intimamente ligada ao tipo, natureza e estado de alteração das formações geológicas, assim como à presença de água subterrânea, elementos químicos naturais e elementos contaminantes estranhos ao meio. Para determinar se estamos perante um valor anómalo de resistividade em determinado terreno é necessário conhecer a gama de resistividades típicas desse tipo de terreno. Na figura III.9 encontram-se valores típicos de resistividade em alguns materiais geológicos.

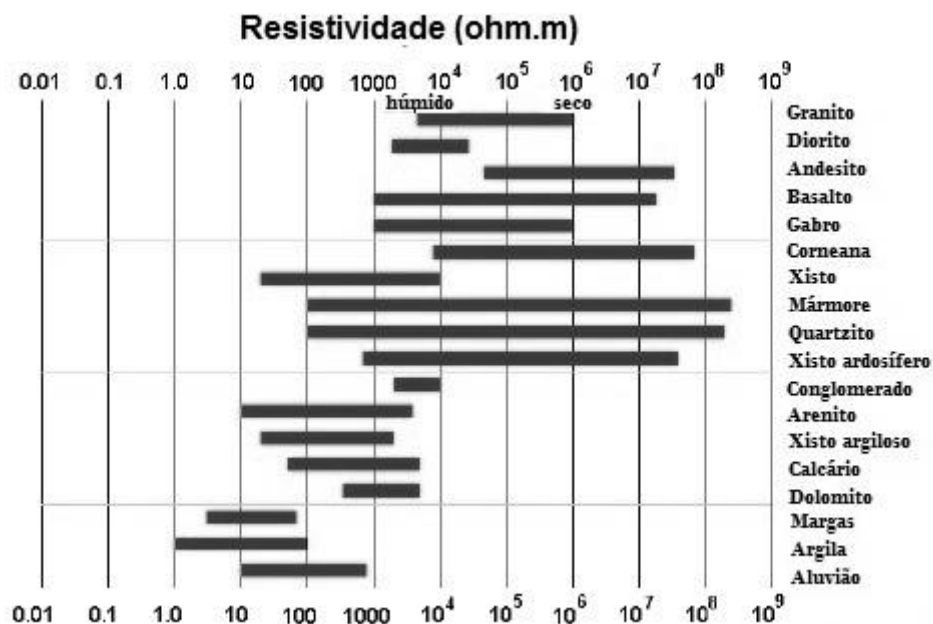


Figura III.9 – Valores típicos de resistividade em materiais geológicos (Segundo Keller e Frischknecht 1966, Daniels and Alberty 1966, Telford et al. 1990 adaptado de Loke, 2013).

As rochas ígneas e metamórficas têm valores de resistividade elevados, variando consoante o grau de alteração, o grau de fracturação e a percentagem de água que preenche as fracturas, função das condições de temperatura e humidade no local. Pelo contrário, as rochas sedimentares, que são mais porosas e com maior conteúdo

em água, apresentam valores de resistividade mais baixos, que dependem essencialmente da porosidade das rochas e da salinidade da água nelas contida (Loke, 2004).

A propagação de corrente elétrica em solos e rochas ocorre maioritariamente devido ao deslocamento de iões dissolvidos na água contida nos seus poros e fissuras, sendo afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, temperatura, conteúdo em água, quantidade e composição dos sais dissolvidos (McNeill, 1980a).

A condução da corrente elétrica através de iões (condução iónica ou eletrolítica) é o processo de condução de maior importância e interesse na prospecção pelo método da resistividade eléctrica (Orellana, 1972). Uma vez que a grande maioria das rochas e solos são maus condutores, as suas resistividades deveriam ser extremamente altas, não fosse pelo fato de, usualmente, elas apresentarem no seu interior poros que estão preenchidos por fluidos, principalmente água (Telford et al., 1990).

Dado que cada ião transporta uma pequena quantidade de carga, quantos mais estiverem presentes na solução, maior é a carga elétrica transportada. Deste modo, as soluções que tiverem um maior número de iões terão uma condutividade mais elevada e consequentemente uma resistividade mais baixa. De uma maneira geral, para uma dada porosidade, uma rocha cujos poros estão preenchidos por uma água salina será tanto mais condutiva quanto maior for a salinidade dessa água. A salinidade é assim um dos fatores principais que condicionam a resistividade das rochas. Outro fator é a porosidade já que quanto maior ela for, maior poderá ser o número de iões dissolvidos nas águas intersticiais. No entanto sendo a condução elétrica processada por via eletrolítica, é necessário que exista uma interligação dos vários poros, de tal forma que a corrente elétrica possa circular ao longo das rochas. Este facto está relacionado com a compactação dos materiais geológicos, reflectida pela sua textura.

Em 1942, Archie (1942) estabeleceu uma expressão empírica (Eq. III.11) para a resistividade efetiva (ρ_e) de uma rocha cujos poros estão parcialmente preenchidos por água:

$$\rho_e = a\phi^m s^n \rho_w \quad (\text{Eq. III.11})$$

Onde:

ρ_w = resistividade da água intersticial

ϕ = porosidade da rocha

s = fracção dos poros preenchidos com água

a, n e m são parâmetros experimentais que dependem do tipo de rocha

A porosidade da rocha (ϕ) é a razão entre o volume dos poros e o volume total da rocha. O valor de a depende da litologia e varia entre 0.5 e 2.5, o valor de n é próximo de 2.0 para o caso em que mais de 30% dos poros se encontram preenchidos e o valor de m depende do grau de compactação da rocha variando entre 1.3 e 2.5 (Telford et al., 1990). Ao quociente entre a resistividade efectiva e a resistividade da água intersticial denomina-se “factor de formação”. A resistividade correspondente ao estado saturado (ρ_{sat}) será então dada por:

$$\rho_{sat} = a\phi^{-m}\rho_w \quad (\text{Eq. III.12})$$

Simplificando na lei de Archie:

$$\rho_e = \rho_{sat} S^{-n} \quad (\text{Eq. III.13})$$

Estas condições possibilitam a aplicação da resistividade eléctrica em estudos hidrogeológicos e ambientais, onde a água e eventualmente contaminantes ricos em sais estão presentes nos poros e descontinuidades da rocha (Elis et al., 2004).

Valores baixos de resistividade são indicativos da presença de contaminantes inorgânicos pois, devido ao aumento da carga iónica, estes facilitam o fluxo de corrente e como tal a resistividade é menor. Quando substâncias contaminantes estão presentes no solo/água ocorrem mudanças nas suas propriedades eléctricas, como acontece nas plumas de contaminação geradas pela infiltração de lixiviados provenientes de depósitos de RSU, que causam diminuição localizada da resistividade que pode ser detectada pela aplicação do método da resistividade eléctrica.

O conhecimento da distribuição espacial da resistividade eléctrica em profundidade, a partir de registos efectuados à superfície, permite identificar e caracterizar estruturas geológicas sub-superficiais, deduzir zonas de percolação preferencial de águas subterrâneas e delimitar plumas de contaminantes (Graça & Mota, 2002).

III.1.3.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

A realização dos perfis de resistividade eléctrica referentes a este estudo foi efectuada tendo por base o arranjo Wenner-Schlumberger, que resulta de uma combinação entre os arranjos típicos de Wenner e Schlumberger. Inicialmente foram efectuados três testes com os arranjos Dipolo-Dipolo, Wenner e Wenner-Schlumberger (Fig. III. 10), no mesmo local (perfil de resistividade 1, Fig. III.11c).

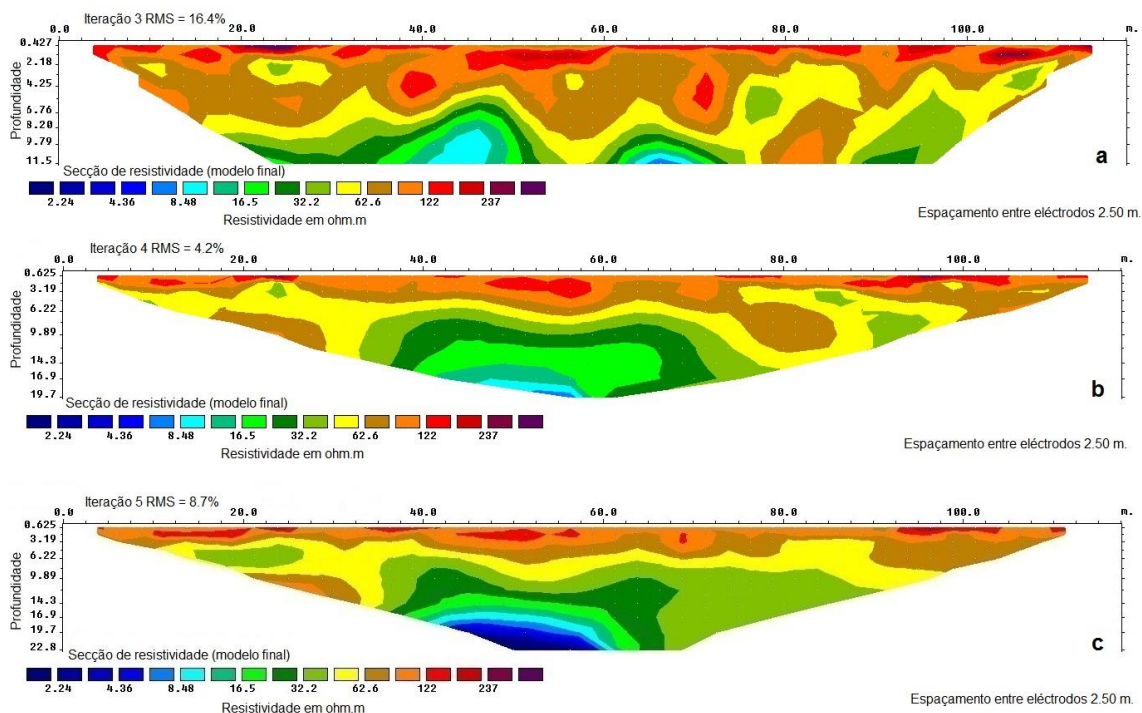


Figura III.10 – Secções de resistividade obtidas com os arranjos Dipolo-Dipolo (a) Wenner (b) e Wenner-Schlumberger (c).

A configuração de eléctrodos Wenner-Schlumberger foi escolhida, por um lado, porque permite uma profundidade de investigação maior mediante o espaço disponível para a implantação dos eléctrodos e, principalmente, porque se verificou que o ruído do local tornava inviável a aquisição com Dipolo-Dipolo. Neste último, os sinais obtidos nos dipolos de potencial mais afastados do dipolo de corrente eram baixos. O erro obtido na inversão dos dados obtidos com a configuração de eléctrodos Dipolo-Dipolo é superior ao obtido com a configuração Wenner e Wenner-Schlumberger (Fig. III. 10). Assim sendo, o arranjo Wenner-Schlumberger acaba por ser uma boa alternativa entre a configuração Wenner e a configuração Dipolo-Dipolo, permitindo obter uma maior profundidade de investigação do que o Wenner, com uma força de sinal maior do que o Dipolo-Dipolo.

Devido às circunstâncias próprias do local de estudo não foi possível que todos os perfis tivessem a mesma extensão, assim sendo a sua extensão variou entre os 94 m e os 141 m. Foram realizados 32 perfis de resistividade elétrica (Fig. III.11b,c), 27 dos quais a contornar o VC e 5 em cima do VC.

O equipamento utilizado para a realização dos perfis de resistividade elétrica (Fig. III.11a,b), é composto por um Resistímetro Syscal Júnior Switch 48, da Iris

Instruments, com 48 eléctrodos de aço inoxidável de elevada qualidade, ligados através de um multicabo e programado em PC através de um programa próprio (ELECTREII).

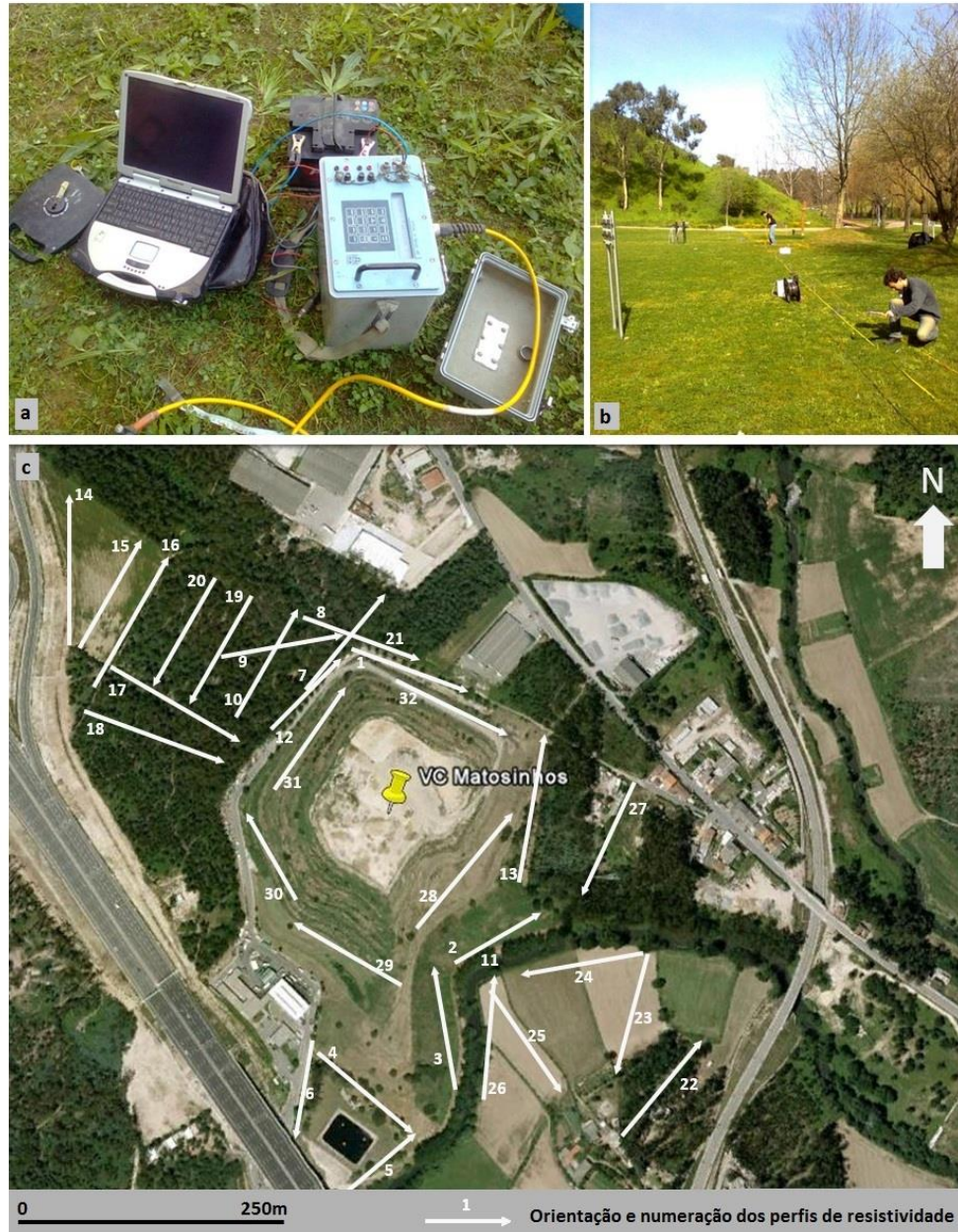


Figura III.11 – Método RE: a – equipamento Syscal Júnior Switch 48; b – instalação do equipamento para realização de um perfil de RE; c - localização e orientação dos perfis de realizados (seta do início para o fim).

O programa identifica o número de eléctrodos disponíveis, seguindo-se a selecção da geometria pretendida para que o programa distribua as sequências geométricas de quadri-eléctrodos. Define-se o valor da injeção de corrente (500ms) e o espaçamento entre eléctrodos (Fig. III.12).

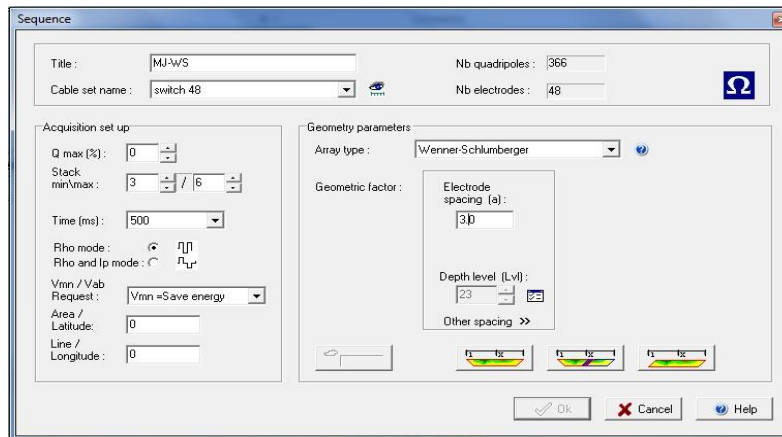


Figura III.12 – Definição das características de aquisição dos dados de resistividade elétrica.

Na área de estudo foram definidas três medidas de espaçamento entre eléctrodos (2 m, 2,5 m e 3 m) consoante a extensão do perfil que era possível executar no local. Isto permitiu obter profundidades de investigação máximas entre os 15,8 m e os 27,4 m. Na figura III.13 ilustra-se a sequência Wenner-Schlumberger, definida no programa ELECTREII, com indicação das medições de resistividade efetuadas por perfil (366 no total).

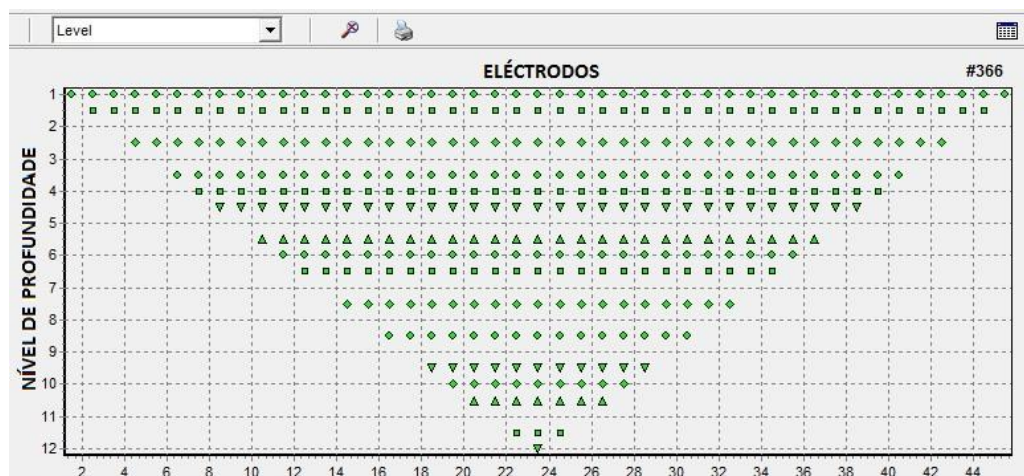


Figura III.13 – Sequência Wenner-Schlumberger utilizada para a obtenção dos dados de resistividade, com a esquematização das leituras efetuadas (366 no total).

Posteriormente, os dados são transferidos para o resistímetro que faz então as leituras, 3 no mínimo e 6 no máximo, de modo a obter uma média de erro mínima entre leituras. Em seguida, o programa PROSYS permite transferir os dados do resistímetro para o computador, fazendo um primeiro processamento e filtragem dos dados que depois são convertidos e exportados para o programa RES2DINV (Loke, 2004) onde os dados são modelados e interpretados.

III.1.4. MÉTODOS SÍSMICOS

III.1.4.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS

O princípio básico de todos os métodos sísmicos é a criação controlada de ondas elásticas por uma fonte sísmica, com o objectivo de obter uma imagem da subsuperfície (Knodel et al., 2007). As fontes de energia sísmica produzem dois tipos de ondas sísmicas, volúmicas e superficiais.

As ondas volúmicas classificam-se em dois tipos (Fig. III.14):

- Ondas P (primárias, longitudinais, de compressão), com deslocação de partículas paralelamente à direcção de propagação da onda. São as primeiras a atingir a superfície terrestre, a partir da fonte;
- Ondas S (secundárias, transversais, de cisalhamento), com deslocação de partículas perpendicular à direcção de propagação da onda.

Ao chegarem à superfície as ondas volúmicas geram ondas superficiais que se propagam a menor velocidade e que podem ser de dois tipos (Fig. III.14):

- Ondas L (Love), que são ondas de torsão, em que o movimento das partículas é paralelo à superfície terrestre e perpendicular à direcção de propagação da onda;
- Ondas R (Rayleigh), que são ondas em que o movimento das partículas ocorre no sentido oposto à direcção de propagação, descrevendo uma elipse.

A velocidade das ondas sísmicas é o parâmetro fundamental resultante da aplicação dos métodos sísmicos. Esta depende das propriedades elásticas, bem como da densidade do meio e varia de acordo com a litologia, a porosidade, a saturação do fluido contido nos poros e fracturas e o grau de compactação (Knodel et al., 2007). As ondas P têm uma maior velocidade de propagação do que as ondas S. As ondas S não se podem propagar em fluidos porque estes não suportam tensões de cisalhamento (Knodel et al., 2007).

Durante a sua propagação no subsolo as ondas sísmicas são reflectidas, refractadas ou difractadas quando ocorrem contrastes elásticos entre camadas geológicas com diferentes propriedades ou na presença de obstáculos artificiais. O registo das ondas sísmicas que regressam à superfície, a partir de uma

fonte superficial, permite tirar conclusões sobre a presença de estruturas e sobre a composição litológica do subsolo. Pela medição dos tempos de chegada das ondas sísmicas e pela determinação das velocidades específicas dos materiais é possível construir um modelo geológico da área estudada (Knodel et al., 2007).

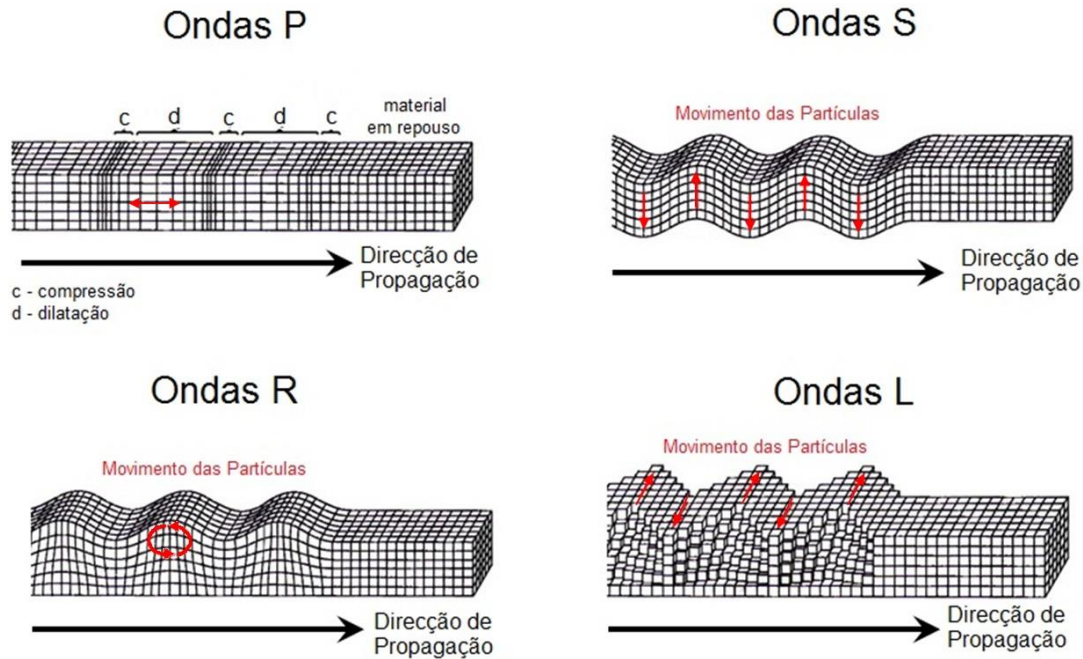


Figura III.14 – Movimento das partículas (a vermelho) associado à propagação das ondas sísmicas volúmicas (P, S) e superficiais (R, L) e respectiva deformação elástica (adaptado de Lowrie, 2007).

Qualquer velocidade de uma onda elástica (V) está relacionada com os módulos de elasticidade e com a densidade do material (ρ). Assim sendo, a velocidade das ondas P (V_P) pode ser obtida pela equação Eq. III.14, e a velocidade das ondas S (V_S) através da Eq. III.15.

$$V_P = \sqrt{[(k+4\mu/3)/\rho]} \quad (\text{Eq. III.14})$$

$$V_S = \sqrt{(\mu/\rho)} \quad (\text{Eq. III.15})$$

As equações III.14 e III.15 sugerem que as rochas de alta densidade devem ter baixas velocidades sísmicas, mas como as constantes elásticas normalmente aumentam rapidamente com a densidade, o inverso é geralmente verdadeiro (Dobrin & Savit, 1988).

No caso do módulo de rigidez (μ) ser igual a zero (como é o caso para meios líquidos e gasosos), V_P diminui. Um aspecto das ondas P, resultante da equação III.14, é o facto de estas serem significativamente mais lentas enquanto se propagam através de

rochas porosas e altamente fracturadas (Sharma, 1997). Pela equação III.15, verifica-se que V_S se torna igual a zero quando μ é zero, motivo pelo qual as ondas S não se podem propagar através de meios líquidos e gasosos. Uma vez que as constantes elásticas são positivas, V_P é sempre maior do que V_S (Sharma, 1997).

Conhecendo a densidade e a velocidade das ondas P e S de um solo ou rocha, todas as constantes elásticas podem ser calculadas, uma vez que estão relacionadas através das seguintes equações (III.16, III.17, III.18, III.19):

$$(V_P/V_S)^2 = 2(1 - \sigma) / (1 - 2\sigma) \quad (\text{Eq. III.16})$$

$$\sigma = [2 - (V_P/V_S)^2] / 2[1 - (V_P/V_S)^2] \quad (\text{Eq. III.17})$$

$$\mu = q / 2(1 + \sigma) \quad (\text{Eq. III.18})$$

$$K = q / 3(1 - 2\sigma) \quad (\text{Eq. III.19})$$

Onde σ é o coeficiente de Poisson, q é o módulo de Young e K é o módulo volumétrico.

A maioria das metodologias sísmicas fornece estimativas de velocidade das ondas P, que acabam por ser indicadores da qualidade da rocha. Na Figura III.15 indicam-se intervalos de velocidade das ondas P para rochas comuns e também a sua escarificabilidade. Escarificabilidade é uma forma empírica de caracterizar um terreno com base na maior ou menor capacidade de este resistir à passagem de uma ferramenta metálica (“ripper”) aplicada na parte traseira de uma máquina de terraplanagem, função do tipo de potência da máquina utilizada (Milsom, 2003).

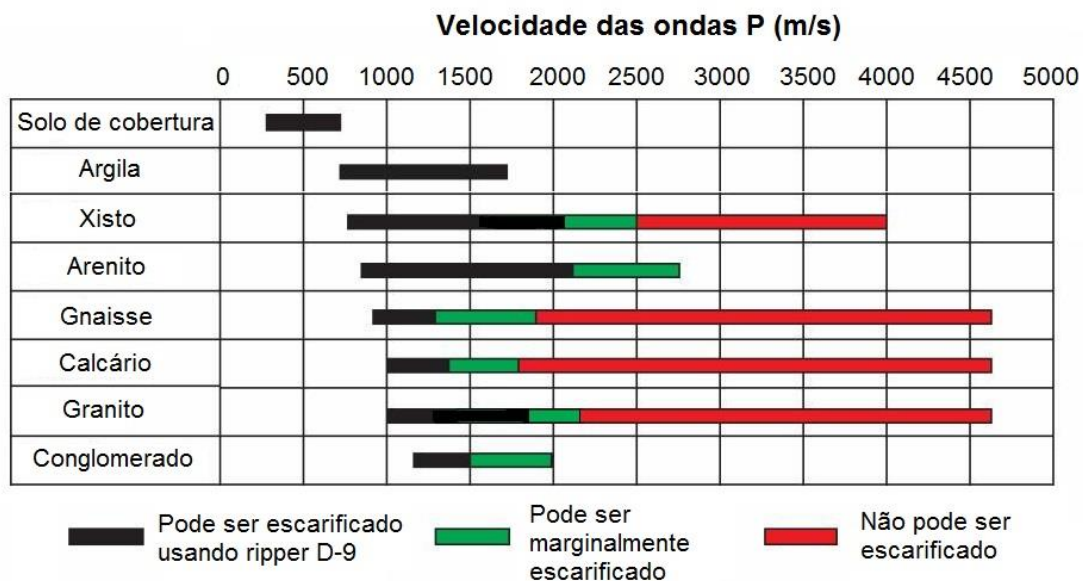


Figura III.15 – Gamas de velocidades de ondas P e escarificabilidade em materiais geológicos usando ripper D-9 (adaptado de Caterpillar Tractor Company, 1982).

Em rochas secas, os espaços estão preenchidos por ar ($V_p = 330\text{m/s}$) em vez de água ($V_p = 1500\text{m/s}$). Geralmente, materiais secos têm velocidades de ondas P muito baixas e assim o nível da água é normalmente uma interface sísmica de destaque (Milsom, 2003).

Em geral, os valores das velocidades das ondas sísmicas (Benson et al., 1983) são maiores em:

- Rochas mais densas, do que em rochas menos densas;
- Rochas mais antigas, do que em rochas mais recentes;
- Rochas ígneas, do que em rochas sedimentares;
- Rochas não fracturadas, do que em rochas fracturadas;
- Rochas não meteorizadas, do que em rochas meteorizadas;
- Sedimentos consolidados, do que em sedimentos não consolidados;
- Sedimentos não consolidados saturados em água, do que em sedimentos não consolidados sem água;
- Solos húmidos, do que em solos secos.

O **método da refacção sísmica** utiliza uma fonte que gera um impulso sísmico no terreno produzindo ondas sísmicas, que depois de percorrerem o seu trajecto em profundidade, e por refacção, são detectadas à superfície em geofones colocados a várias distâncias da fonte (Figura III.16). Os geofones convertem a vibração mecânica das ondas sísmicas num sinal eléctrico que é transmitido por cabo para um sismógrafo (Benson et al., 1983).

Quando uma onda sísmica encontra uma interface entre dois tipos de rocha diferentes, parte da energia é reflectida e a restante continua o seu caminho com um ângulo diferente, isto é, é refractada. A refração é regida pela lei de Snell, que relaciona os ângulos de incidência (i_1) e refração (i_2) com as velocidades sísmicas nos dois meios (V_1 e V_2):

$$\sin i_1 / \sin i_2 = V_1/V_2 \quad (\text{Eq. III.20})$$

O método da refração sísmica utiliza o processo de refração crítica para determinar a profundidade e a inclinação dos limites entre camadas, assim como a velocidade das camadas. Uma onda criticamente refratada ocorre quando a onda é refratada segundo o ângulo crítico (i_c). Esta onda propaga-se ao longo da interface entre os meios 1 e 2.

Segundo o Princípio de Huygens a interacção da onda criticamente refratada com a interface entre as camadas produz ondas secundárias que são transmitidas como “headwaves” (Figura III.16) para a superfície, onde podem ser registadas pelos geofones, a diferentes distâncias da fonte sísmica. Esta é a base para aplicação do método de refacção sísmica. Para ângulos de incidência maiores não há refacção e toda a energia é reflectida (Knodel et al., 2007).

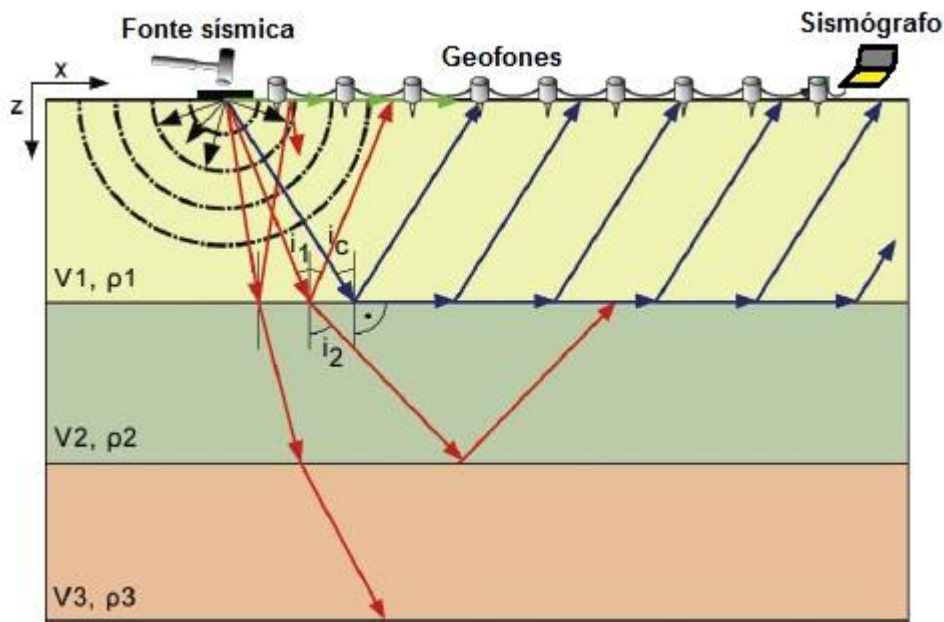


Figura III.16 – Esquema representativo do trajecto de ondas sísmicas num modelo de 3 camadas com velocidades (V_1 , V_2 e V_3) e densidades (ρ_1 , ρ_2 e ρ_3). Verde: onda directa, vermelho: ondas reflectidas; azul: ondas refractadas criticamente (adaptado de BURVAL, 2006).

Embora um certo número de ondas elásticas esteja associado ao método sísmico, os métodos sísmicos que têm sido aplicados a casos de contaminação associada a depósitos de RSU utilizam mais frequentemente a refacção das ondas P (Lanz et al., 1998). Pelo facto de estas serem as primeiras ondas a chegar, torna também mais fácil a sua identificação.

O método da refacção sísmica é adequado para a caracterização mecânica do subsolo, investigação de estruturas geológicas, determinação da profundidade do maciço rochoso, estimação da espessura e limites de camadas geológicas, e também para delimitação de estruturas de depósitos de resíduos e investigação abaixo de superfícies seladas (Knodel et al., 2007).

O **método MASW** (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) analisa a medida da dispersão das ondas superficiais, do tipo Rayleigh e Love. Este método foi introduzido no final da década de 90 pela Kansas Geological Survey (Park et al., 1999). O método das ondas de superfície fornece de forma indirecta velocidades das ondas S a partir da determinação das velocidades das ondas Rayleigh (R).

As ondas R propagam-se à superfície directamente da fonte para o receptor. Dependendo do seu comprimento de onda, a sua amplitude diminui com a profundidade. São uma importante fonte de informação para investigação de camadas superficiais (ex: Hering et al., 1995; Socco & Strobbia, 2004).

Num meio em camadas em que as velocidades sísmicas mudam com a profundidade, as ondas superficiais têm propriedades de dispersão. Isto significa que frequências diferentes, com diferentes profundidades de penetração, implicam diferentes velocidades de propagação: frequências elevadas têm pouca penetração e frequências baixas têm uma penetração mais profunda (Park et al., 1997).

A velocidade de propagação para cada comprimento de onda, designada velocidade de fase (Bath, 1973), depende principalmente da velocidade da onda S do meio e da profundidade de penetração, sendo influenciada apenas ligeiramente por V_P , ρ e σ . Assim sendo, a velocidade da onda superficial é um bom indicador da V_S .

Analisando a característica de dispersão das ondas R, podem ser construídos perfis de V_S superficiais e o correspondente μ pode ser calculado pela relação entre os dois parâmetros (Eq. III.15). Mudanças na ρ com a profundidade são normalmente menores em comparação com as variações de μ que assim é desprezado ou estimado. Conhecendo (ou estimando) σ , também é possível obter um perfil de V_P através de um perfil de V_S (Park et al., 1997).

O método MASW é um método eficiente para investigar as propriedades elásticas dos materiais próximos da superfície, o que lhe confere utilidade em vários campos da geotecnia. A sua eficiência está relacionada com a correcta aplicação de técnicas de campo e de processamento de dados. Esta metodologia permite visualização quantitativa das propriedades elásticas dos materiais próximos da superfície sob a forma de perfis de V_S , mas também visualização qualitativa de algumas heterogeneidades próximas da superfície (Park et al., 1997).

III.1.4.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados sísmicos foram obtidos através da realização de dois perfis sísmicos, um a Norte do VC e um a Sul do VC (Figura III.17a). A estratégia de aquisição baseou-se no método da refração sísmica (SR), S1 e S2, e na metodologia MASW, S1_M e S2_M. Para tal foi utilizado o sismógrafo RAS-24, da Seistronix, com 24 bits de resolução.

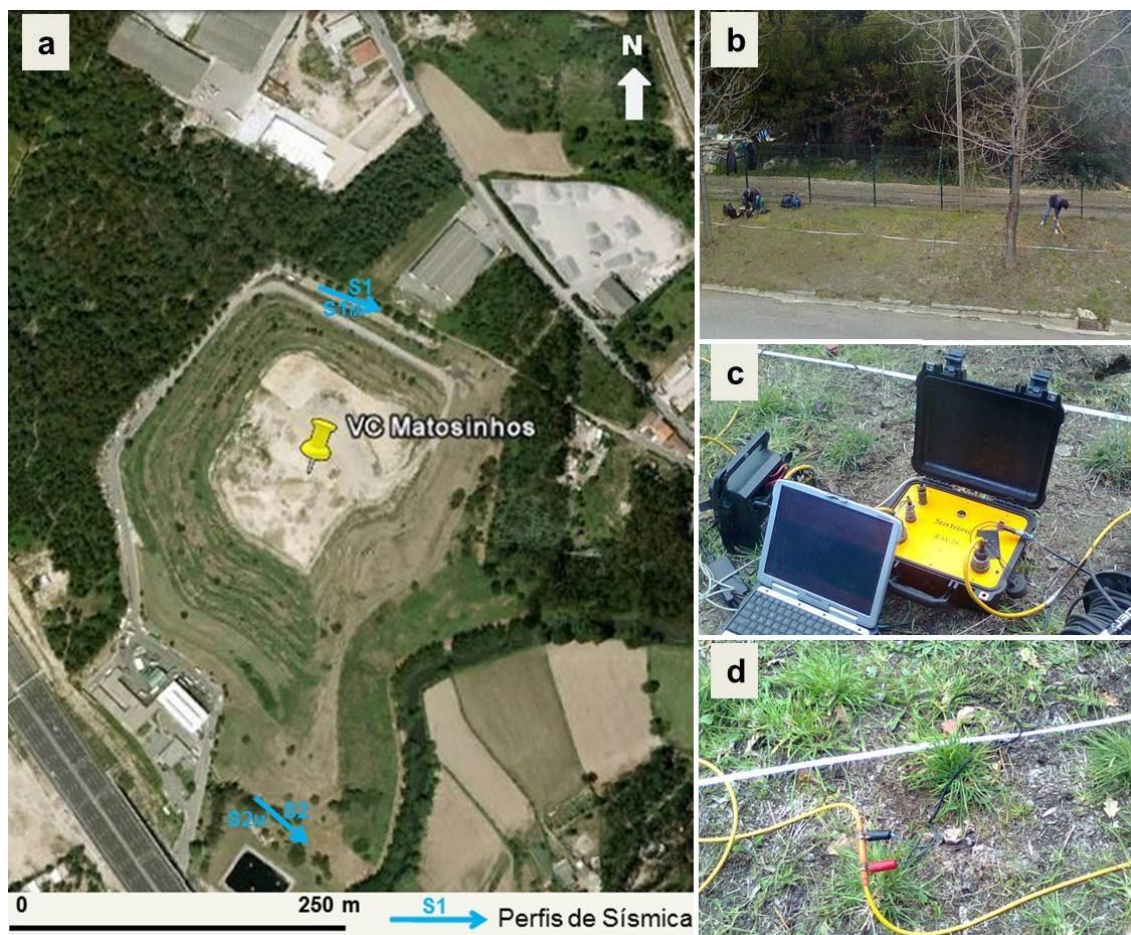


Figura III.17 – Métodos Sísmicos: a – localização dos perfis realizados; b – aquisição de dados sísmicos (S1); c, d – equipamento utilizado para realização dos perfis sísmicos: geofones, cabo eléctrico, sismógrafo e PC.

Para a recolha dos dados de SR foi seleccionada uma taxa de amostragem 0,25 ms, numa janela de tempo de 0,7s. Como fonte do sinal sísmico foi utilizada uma marreta de 3kg (Figura III.17b) aplicada de forma repetida e tirando partido da característica de “*signal enhancement*” do sismógrafo, ou seja, da capacidade de somar várias deflagrações para melhorar o sinal recebido. A fonte foi aplicada em cinco pontos: um directo, três centrais e um inverso (Figura III.18a). Foram utilizados 24 geofones

(Figura III.17d) de 4,5Hz com espaçamentos de 2m, para cada um dos ensaios efectuados.

Esta estratégia permitiu ainda a realização de dois ensaios pelo método MASW nos tiros directo e inverso, aproveitando o sistema de aquisição de dados de SR (Figura III.18b).

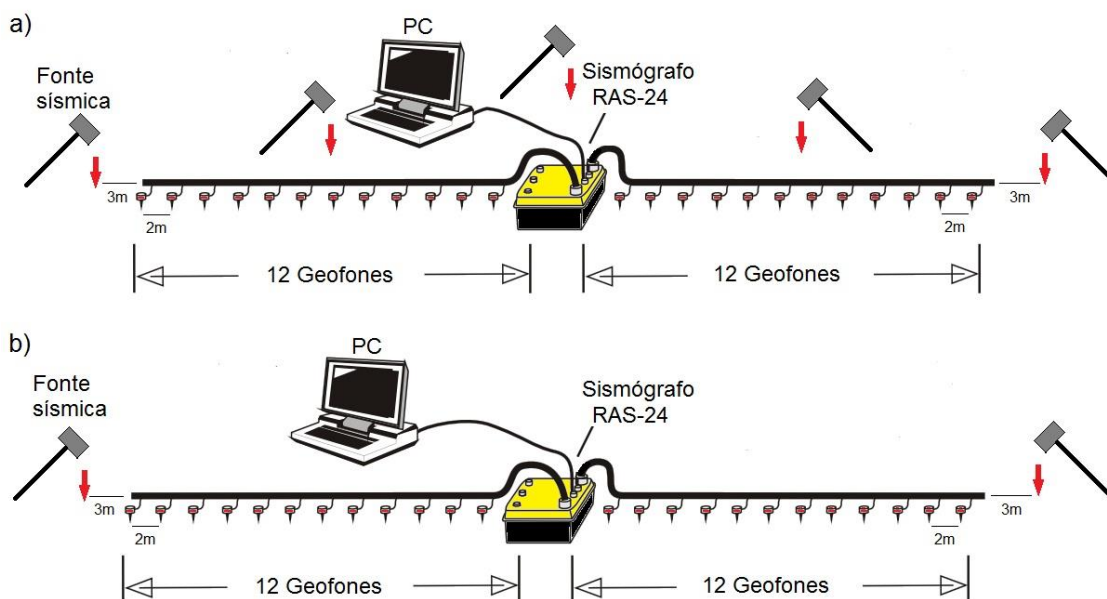


Figura III.18 – Esquema da aquisição de dados sísmicos: a) sísmica de refração; b) MASW.

A importância da presença da característica de “signal enhancement” no sismógrafo está relacionada com o facto dos métodos sísmicos medirem vibrações do terreno e, como tal, serem sensíveis a ruídos de diversas fontes.

Vibrações indesejáveis que afectam o sinal sísmico no geofone podem ser causadas por ventos fortes que movem árvores próximas, sons de aviões, veículos em movimento em auto-estradas próximas, caminhos ferroviários próximos, pessoas a andar perto, explosões/detonações próximas, operações de construção com equipamentos pesados nas imediações (Pelton, 2005).

O aumento do sinal é uma ajuda significativa quando se trabalha em ambientes com muito ruído ou com pequenas fontes de energia. Esse aumento é conseguido pela adição de um certo número de sinais sísmicos resultantes de deflagrações consecutivas (Benson et al., 1983).

O sinal sísmico aumenta directamente com o número de pancadas, enquanto o ruído aleatório no sinal sísmico é aumentado apenas pela raiz quadrada do número de pancadas. Isso faz com que o sinal sísmico cresça para além do nível de ruído, permitindo a operação em ambientes ruidosos e aquisições de dados com distâncias maiores entre fonte (martelo) e receptor (geofone). De uma maneira geral obtém-se uma medição mais precisa dos primeiros tempos de chegada (Benson et al., 1983), bem como um aumento da amplitude dos sinais coerentes.

Depois dos dados colhidos os tempos de chegada podem ser determinados no *software* Seistronix RAS-24 e transferidos para o *software* de inversão apropriado para cada método. No caso da refração sísmica foi utilizado o SeisOpt@2D e no caso da metodologia MASW o *software* utilizado foi o winMASW.

III.2. ANÁLISES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS

Até ao momento foram enunciadas metodologias indirectas de obter informações em profundidade. Neste subcapítulo irão ser abordadas técnicas directas de investigação que possam contribuir para a confirmação das informações obtidas através dos métodos geofísicos.

De forma a otimizar a recolha de amostras de água na envolvente ao VC e reduzir os custos associados à elaboração das análises físico-químicas, foi efectuada uma pesquisa sobre os dados já existentes. Mediante os resultados obtidos e as características do local em estudo foram seleccionados novos locais para recolha de amostras de água a montante e a jusante do VC.

Na Figura III.19 estão localizados todos os pontos de amostragem utilizados para recolha de águas subterrâneas e superficiais. Os pontos de recolha com a designação Piezómetro1, 2 e 3 representam os locais de amostragem das águas subterrâneas entre 2005 e 2007 e, também, em 2010. O termo drenagem é referente à rede de drenagem de águas pluviais que existe no local. Pz1, 2, 3, 4 e 5 são relativos a piezómetros de monitorização das águas subterrâneas em 2011 e 2012. Montante e Jusante são locais de recolha de água do rio Leça em 2010, respectivamente a montante e a jusante do VC de Matosinhos. Poço1, Poço2 e Furo são pontos de recolha de águas subterrâneas em 2011. Nascente representa local de recolha de água superficial em 2011.

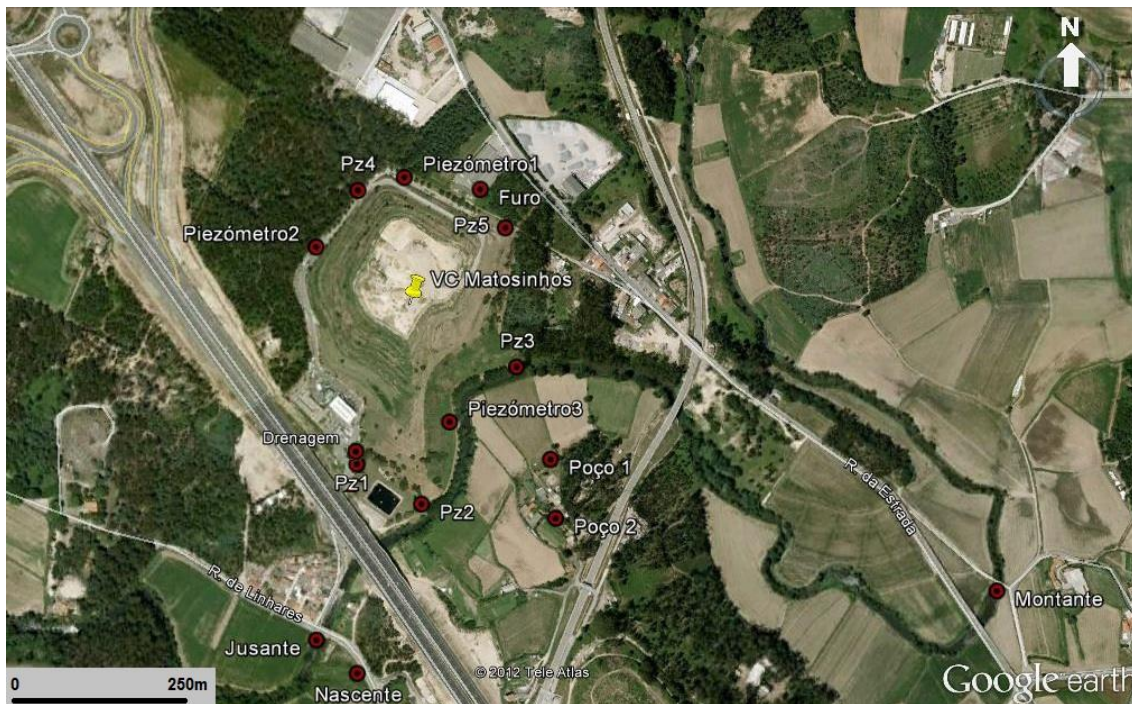


Figura III.19 – Localização dos pontos de amostragem de águas na área de estudo.

Com a realização desta amostragem e consequentes análises pretende-se registar ao longo do tempo, e nas diferentes estações do ano, os parâmetros físico-químicos que possam indicar a potencial deterioração da qualidade das águas subterrâneas e, eventualmente, detectar alterações significativas nesses parâmetros, correlacionáveis com eventuais fugas de lixiviados e/ou com a existência de circuitos preferenciais para a dispersão desses contaminantes.

Os resultados obtidos serão comparados com os Valores Máximos Recomendados (VMR) e Valores Máximos Admissíveis (VMA) para águas destinadas a consumo humano e para águas destinadas a rega, previstos no Decreto-Lei 236/98, de 1 de Agosto, e no Decreto-Lei 243/2001, de 5 de Setembro. Serão, então, identificados os parâmetros que se encontram fora desses limites, em cada local amostrado, de forma a verificar os que indiciam contaminação para as águas e solos da região.

Para obtenção desses resultados foram utilizados os métodos analíticos de referência, indicados no Decreto-Lei 236/98, de 1 de Agosto, nomeadamente:

- Electrometria, para determinação do pH e condutividade;
- Espectrometria atómica, para determinação dos teores em Alumínio (Al), Arsénio (As), Boro (B), Bário (Ba), Cálcio (Ca), Cádmio (Cd), Crómio (Cr),

Cobre (Cu), Ferro (Fe), Prata (Hg), Potássio (K), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Chumbo (Pb),...

- Espectrometria de absorção molecular, para determinação dos teores em Nitratos (NO_3), Nitritos (NO_2), Cloretos (Cl), Azoto Amónico (NH_4), ...

Todas as análises foram efectuadas num laboratório acreditado pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC), Laboratório SUMA Matosinhos.

De uma forma geral, quando se pretende detectar contaminação em águas sob influência de depósitos de resíduos é importante analisar parâmetros como o pH, a condutividade eléctrica e o teor de cloretos. Estes parâmetros devem ser monitorizados com uma periodicidade trimestral (Decreto-Lei 236/98), a fim de verificar alterações que possam ser indicativas de fuga de lixiviados provenientes da massa de resíduos.

A importância da análise da condutividade eléctrica prende-se com o facto de esta ser normalmente considerada uma medida representativa da quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) na água subterrânea. O conteúdo em cloretos é usado como parâmetro indicador da presença de lixiviados, uma vez que, para além da diluição, sofre muito pouca alteração química ou biológica no sistema de águas subterrâneas (Baedeker & Apgar, 1984).

Os lixiviados provenientes dos aterros têm geralmente uma composição fortemente variável, que depende do conteúdo dos resíduos, da sua idade e das condições de oxidação-redução (Chian e DeWalle, 1976). No entanto a maior parte dos aterros produz um lixiviado rico em cloretos, uma vez que estes iões normalmente seguem o fluxo de água.

Assim sendo as análises de cloretos e de condutividade estão entre as análises químicas mais comuns utilizadas nos programas de monitorização de água subterrânea e superficial que circundam os aterros.

Uma vez que a presença de iões cloreto aumenta significativamente a condutividade da água subterrânea, estes dois parâmetros estão directamente ligados e a sua determinação de forma directa pode assim ser comparada com as medições indirectas

de condutividade/resistividade resultantes da aplicação de métodos geofísicos (Olofsson et al., 2006).

Para uma análise mais aprofundada das amostras de água recolhidas foram, sempre que possível, analisados outros parâmetros para obter informação sobre quais os elementos responsáveis pela contaminação dessas águas e sobre o tipo de água existente na área de estudo. Foram analisados parâmetros como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , Al^{3+} , Fe^{2+} , Ba^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Hg^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} .

De forma a conseguir interpretar de forma adequada os resultados das análises de água subterrânea da área de estudo é importante ter uma noção tão aproximada quanto possível da composição dos resíduos depositados no VC de Matosinhos ao longo dos anos. No entanto essa informação existe apenas no caso dos resíduos mais recentes, depositados entre 1993 e 2003. Contudo, podemos admitir que a composição média dos resíduos depositados até então, não será muito diferente da dos resíduos depositados no último período.

Na Figura III.20 apresentam-se os resultados da composição dos resíduos depositados desde a recuperação da lixeira até ao ano de 2003 (10 anos), segundo Russo (2005), estando estes divididos em: RSU, resíduos de construção e demolição (RCD), terras para acondicionamento, resíduos de limpeza de valetas, resíduos equiparados a RSU e resíduos industriais banais (RIB). Representando os RSU a maior percentagem (51%) na composição global dos resíduos para o período em causa. Para um maior detalhe sobre a tipologia destes RSU apresenta-se na Figura III.21 a composição qualitativa média dos RSU recebidos no VC de Matosinhos durante o período 2000-2002 (Russo, 2005). A maioria dos RSU depositados neste período corresponde a matéria fermentável, papel e cartão, sendo também relevante a deposição de plástico e finos (essencialmente com a dimensão areia).

No entanto não existe informação absoluta sobre o tipo de resíduos depositados durante os cerca de 20 anos em que este local foi uma lixeira a céu aberto. Esta incógnita poderá vir a ser parcialmente esclarecida no caso de serem encontrados certos elementos nos lixiviados ou nas águas subterrâneas cuja proveniência pode ser típica de determinados tipos de resíduos.

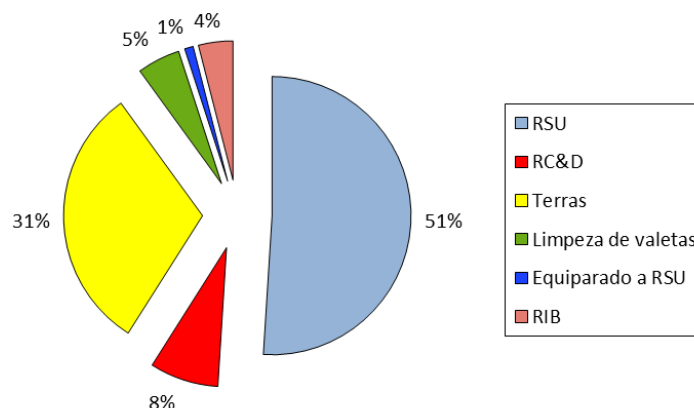


Figura III.20 - Composição dos resíduos depositados no VC de Matosinhos entre 1993-2003 (adaptado de Russo, 2005).

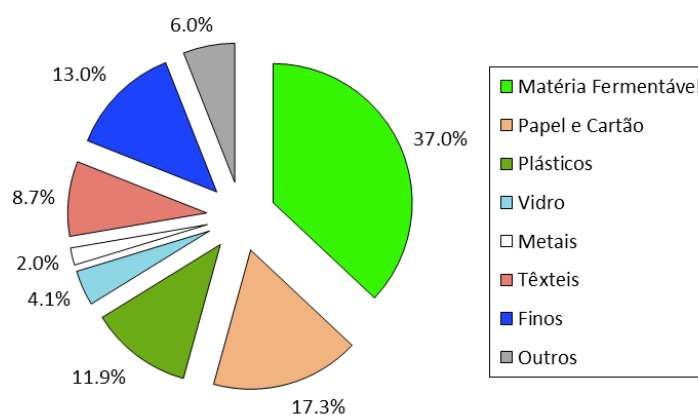


Figura III.21 - Composição qualitativa média dos RSU recebidos no VC de Matosinhos durante o período 2000-2002 (adaptado de Russo, 2005).

De uma forma geral a presença de determinados iões no lixiviado está relacionada com a presença de determinados resíduos (Tab. III.1).

A água que passa pelos resíduos em decomposição transporta consigo, numa primeira fase os compostos mais solúveis enquanto os menos solúveis irão produzir contaminantes por alguns anos. Assim sendo, a maioria dos contaminantes, especialmente os orgânicos biodegradáveis, tendem a atingir o pico da concentração no lixiviado nos primeiros meses do processo de lixiviação, reduzindo posteriormente a sua concentração. No entanto, alguns contaminantes, tais como os compostos orgânicos pouco biodegradáveis e compostos metálicos tendem a persistir no lixiviado durante vários anos (Farquhar, 1988).

Tabela III.1 – Exemplos da proveniência de determinados iões presentes nos lixiviados/águas subterrâneas (adaptado de Segato & Silva, 2000).

Iões	Origem possível
Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	Material de origem orgânica ou entulhos de construção.
PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}	Material de origem orgânica
Cu^{2+} , Fe^{2+} , Sn^{2+}	Material electrónico, latas, tampas de garrafas
Hg^{2+} , Mn^{2+} , Ba^{2+}	Pilhas ou lâmpadas fluorescentes
Ni^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}	Baterias telemóveis e de automóveis
Al^{3+}	Latas descartáveis, utensílios domésticos, cosméticos, embalagens de alumínio em geral
Cl^- , Br^- , Ag^+	Tubos de PVC, negativos de filmes e raios-X
As^{3+} , Sb^{3+} , Cr^{3+}	Embalagens de tintas, vernizes, solventes orgânicos

Também a análise dos lixiviados produzidos ao longo do tempo no VC de Matosinhos é importante para entender os valores obtidos nas águas subterrâneas da área de estudo. A informação disponível relativamente às análises físico-químicas dos lixiviados produzidos nos novos alvéolos, obtidos à entrada da estação de tratamento de lixiviados (ETL), é referente ao período entre 1999 e 2003. Na tabela III.2 estes resultados são comparados com os intervalos obtidos em aterros com menos de 2 anos e em aterros com mais de 10 anos, de acordo com Tchobanoglous et al. (1993).

Uma vez que estas análises de lixiviados se referem aos resíduos mais recentes, depositados entre 1993 e 2003, as análises físico-químicas aos lixiviados efectuadas em 2003 deverão estar dentro dos valores relativos aos aterros com mais de 10 anos. No entanto, como muitos dos resíduos foram depositados há menos de 2 anos, estes também se poderão enquadrar no intervalo para aterros com menos de 2 anos (Tabela III.2). De uma forma geral os valores obtidos nos lixiviados do VC de Matosinhos encontram-se dentro dos intervalos definidos por Tchobanoglous et al. (1993), ou um pouco baixo, com excepção do ferro, azoto amoniacal, e pH.

Mas a interpretação mais significativa que se pode obter da análise da tabela III.2 está relacionada com a evolução dos valores de determinados parâmetros ao longo do tempo em que os resíduos foram sendo depositados. Entre 1999 e 2003 verifica-se

que o pH e a concentração de determinados elementos como fosfatos, cloretos, azoto amoniacal, arsénio, cádmio, cobre, selénio e zinco vão diminuindo. Por outro lado, a condutividade eléctrica, crómio, ferro, mercúrio, níquel e chumbo vão aumentando, em resultado, provavelmente do aumento de iões no lixiviado, como consequência da decomposição de certos resíduos com conteúdo metálico (latas, material electrónico, baterias, pilhas e lâmpadas fluorescentes - ver tabela III.1).

Tabela III.2 – Resultados de análises físico-químicas de lixiviados produzidos nos novos alvéolos do VC de Matosinhos (adaptado de Russo, 2005) e intervalos de resultados obtidos em aterros com menos de 2 anos e com mais de 10 anos (Tchobanoglous et al., 1993).

Parâmetros	Unidades	Janeiro 99	Janeiro 00	Janeiro 02	Janeiro 03	Intervalo para aterros novos (<2anos)	Intervalo para aterro com mais de 10 anos
pH, 25º C (Sorensen)		8,03	7,7	7,9	7,6	5 - 7,5	6,6 - 7,5
Temperatura	ºC	16,2	16,4	16	22,2		
Condutividade Eléctrica	µS/cm	21700	20500	8000	26400		
Fosfatos	mg/L	85,1	10,1	12	15	700 - 12000	400 - 600
Cloretos	mg/L	2245	123	1941	912	200 - 3000	100 - 400
Azoto Amoniacal	mg/L	2041	1698	1740	899	10 - 800	20 - 40
Arsénio	mg/L	1,88	0,393	0,05	0,148		
Cádmio	mg/L	0,05	0,013	0,025	0,025	0,02 - 0,45	0,01 - 0,02
Crómio Total	mg/L	0,121	0,291	0,078	0,318	0,13 - 0,60	0,04 - 0,23
Cálcio	mg/L	74	-	-	-	200 - 3000	100 - 400
Potássio	mg/L	2661	-	-	-	200 - 1000	50 - 400
Cobre	mg/L	0,03	0,01	0,032	0,028	0,08 - 0,30	0,03 - 0,7
Ferro	mg/L	8,9	8	6	1650	50 - 1200	20 - 200
Mercúrio	mg/L	0,009	0,009	0,05	0,05		
Níquel	mg/L	0,003	0,932	0,05	0,058	0,3 - 0,5	0,1 - 0,50
Chumbo	mg/L	0,01	0,01	0,038	0,038	0,05 - 2	0,07 - 2
Selénio	mg/L	1,099	-	0,025	0,026		
Zinco	mg/L	0,222	0,112	0,1	0,102	1 - 170	0,37 - 10

No caso do VC de Matosinhos, a variabilidade de idades dos resíduos que o constituem é muito grande, desde os resíduos mais recentes cujas idades variam entre os 4 e os 10 anos até aos resíduos mais antigos que podem chegar aos 38 anos. Como os resíduos mais antigos se localizam na área do VC não impermeabilizada na base, será de esperar que nas amostras de água subterrânea recolhidas actualmente nessa zona se detectem compostos orgânicos com tempo de degradação mais lenta e compostos metálicos.

Até 2005 não existia um plano de monitorização de águas subterrâneas muito completo, havendo certos parâmetros físico-químicos que não eram analisados de forma consistente. Por esse motivo não foram estudadas em grande pormenor estas

análises. No entanto, como se referem a análises coincidentes com a etapa anterior ao encerramento do VC, as mesmas serão aqui abordadas.

Os piezómetros B e D, assim designados por Russo (2005), correspondem à localização daqueles que designamos no presente estudo como Pz4 e Piezómetro3 respectivamente. As análises efectuadas em 1995 e 2000 (Tab. III.3) revelam que certos parâmetros se encontram acima dos VMR ou VMA para águas de consumo humano e para rega.

Tabela III.3 – Resultados de análises de água subterrânea obtidos nos piezómetros a montante e a jusante do VC de Matosinhos (adaptado de Russo, 2005).

Parâmetros	Unidades	Piezómetro B		Piezómetro D		Água - consumo humano		Água - rega	
		Mai-95	Dez-00	Mai-95	Dez-00	VMR	VMA	VMR	VMA
pH		5.7	7	6.1	7.88	6.5 - 8.5	9.5	6.5 - 8.4	4.5 - 9.0
Cond. Eléctrica	µS/cm		2600		2700	400			
Azoto Amoniacal	mg/L	2.2	1.4	23	4.36	0.05	0.5		
Arsénio	mg/L	0.19	<0.012	0.39	<0.012		0.05	0.1	10
Chumbo	mg/L	<0.012	<0.012	1.31	<0.012		0.05	5	20
Cádmio	mg/L	<0.001	<0.001	0.003	<0.001		0.0005	0.01	0.05
Crómio	mg/L	0.027	<0.002	0.95	<0.002			0.1	20
Cobre	mg/L	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.1		0.2	5
Níquel	mg/L	0.06	<0.012	0.23	<0.012		0.05	0.5	2
Mercúrio	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005		0.0001		
Zinco	mg/L	0.19	<0.05	0.25	0.0085	0.0001		2	10

Nota explicativa: VMR e VMA para águas destinadas a consumo humano e para águas destinadas a rega (D-L 236/98 e D-L 243/2001). Destacam-se a vermelho os parâmetros fora dos VMR ou VMA (à esquerda) e os respectivos valores de referência (à direita).

De salientar que nas análises de 1995 o pH em ambos os piezómetros se encontra mais ácido do que os VMR para os dois tipos de águas, tendo em 2000 passado para dentro dos valores limite. A condutividade eléctrica é muito elevada em ambos os piezómetros, ultrapassando bastante o VMR para águas de consumo humano. Os valores de azoto amoniacal são em todos os casos superiores aos VMR e VMA para águas do consumo humano, sendo mais elevados no caso do piezómetro a jusante do VC. Detectaram-se ainda em 1995 valores acima do VMA para águas de consumo humano, para níquel e arsénio nos dois piezómetros, facto que deixou de acontecer em 2000. No caso do chumbo, crómio e cobre foram observados valores acima do desejável no piezómetro a jusante do VC. Os valores de zinco estavam acima do VMR para águas de consumo humano, nos dois piezómetros em 1995, mantendo-se ainda elevados em 2000 no caso do piezómetro a jusante.

Deste modo, verifica-se que existiu contaminação das águas subterrâneas neste período, pelas espécies químicas referidas, especialmente a jusante do VC. Estes valores podem assim ser comparados com os valores de análises mais recentes de forma a verificar qual a evolução sofrida por esses parâmetros e qual a actual contaminação das águas subterrâneas.

III.3. ABORDAGEM ESTATÍSTICA AOS DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

No sentido de cumprir um dos objectivos desta tese, procurou-se investigar qual o nível de resistividade que poderia ser considerado anómalo para este enquadramento geológico. Dessa forma, propõe-se uma abordagem diferente entre os demais estudos. Partindo do pressuposto de que a resistividade medida é um parâmetro que depende da geologia, do seu estado de alteração ou porosidade natural, da quantidade de fluidos presentes e do conteúdo químico desses mesmos fluidos surge a dúvida: o que é uma anomalia? Certamente que será uma combinação complexa de factores, mas um valor de resistividade muito baixo, que poderá ser tabelado como característico de plumas de contaminação, pode ser apenas baixo pela presença de argilas ou pelo elevado conteúdo em água mineralizada combinada com elevada porosidade.

Assim sendo, ocorreu a possibilidade da utilização de um método estatístico que é normalmente aplicado a dados geoquímicos (Lepeltier, 1969). Este método, utilizado para definir anomalias geoquímicas foi adaptado para ser utilizado no nosso conjunto de perfis 2D de resistividade de modo a que assim se pudesse relacionar o universo total de valores obtidos em todos os perfis de uma área e assim delinear as anomalias de contaminação na envolvente ao VC com base no critério que o método define. Uma outra característica particular é o facto de esta metodologia estar a ser aplicada a um VC inserido num contexto geológico granítico com permeabilidade superficial controlada por alteração e permeabilidade profunda do tipo fissural, o que não é comum no contexto português (Mota et al., 2004).

O propósito inicial será determinar quais os valores de resistividade de *background* para este contexto geológico de modo a poder então definir o que é a anomalia. Nos estudos geoquímicos é importante determinar os valores de background geoquímico,

de forma a poder interpretar, numa determinada série de dados, quais os valores que poderão ser considerados anómalos. As técnicas estatísticas são uma boa ferramenta para conseguir fazer esse tipo de distinção. O mesmo se pretende neste estudo para os dados geofísicos.

Existem vários parâmetros estatísticos para descrever uma população. Os parâmetros estatísticos mais importantes são os relativos aos valores médios ou típicos da amostra ou da população: média, mediana, desvio padrão e moda (Webster & Oliver, 2007). Na natureza distribuições assimétricas ou enviesadas são frequentes, o que pode ser causado por uma característica geral da população (concentrações naturais de substâncias vestigiais apresentam uma inclinação íngreme no lado esquerdo e têm uma cauda mais longa no lado direito), ou por *outliers* (valores muito altos ou baixos) (Knodel et al., 2007). A média é mais afectada pela assimetria e pelos *outliers* do que a mediana. Por outro lado, a média é mais fácil de usar matematicamente e muitos métodos estatísticos são baseados nela (Knodel et al., 2007).

Variáveis aleatórias seguem frequentemente uma distribuição normal ou de Gauss, descrita por uma curva em forma de sino. As distribuições normais podem ser caracterizadas pela média, variância e desvio padrão. Numa distribuição normal cerca de 68% dos valores encontram-se a menos de um desvio padrão (σ) da média (\bar{x}), cerca de 95% dos valores encontram-se a menos de 2σ da \bar{x} e cerca de 99.7% dos valores encontram-se a menos de 3σ da \bar{x} (Figura III.22).

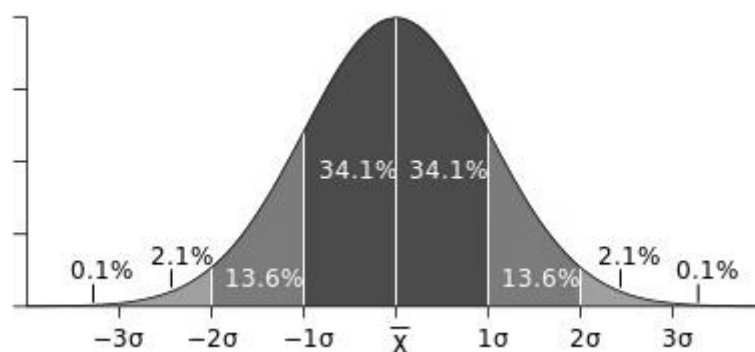


Figura III.22 – Ilustração da curva de Gauss, baseada na média (\bar{x}) e desvio padrão (σ) de uma distribuição normal.

Os levantamentos geofísicos raramente fornecem dados de campo suficientes para aplicar de forma válida os métodos estatísticos, e assume-se frequentemente que as distribuições são normais em vez de se provar que o são (Milsom, 2003). No entanto,

no trabalho aqui desenvolvido, foi recolhido um grande número de valores de resistividade, na totalidade das secções, a tal ponto que será possível validar a aplicação de métodos estatísticos.

Para uma análise adequada das distribuições de dados é necessário que na construção do histograma da população seja escolhido um número de classes adequado à população estudada. Tem de ser encontrado um compromisso entre um número reduzido de classes, que pode suprimir informação, e um número elevado de classes, que pode fazer com que a variação de valores individuais tenha grande influência (Knodel et al., 2007). Pode optar-se pelo número de classes sugerido pelo *software* que está a ser utilizado, ou então utilizar-se uma das seguintes regras:

$$n_c = \sqrt{n} \quad \text{para } n < 1000 \text{ (DVKW, 1990)}$$

$$n_c = 10 \lg n \quad \text{para } n > 1000 \text{ (DVKW, 1990)}$$

ou

$$n_c = \log_2 n + 1 \quad \text{regra de Sturge (Everitt, 1998)}$$

onde:

n - número de dados da população

n_c - número de classes

Na visualização gráfica a distribuição pode ter apenas um pico que representa o valor observado mais frequentemente (moda) e designa-se unimodal, duas modas (bimodal), ou mais do que duas modas (multimodal). Se as observações se referirem a apenas uma população (ex: concentração de cloretos de várias partes de um aquífero) a distribuição resultante é normalmente unimodal. A presença de várias modas indica normalmente a presença de várias populações sobrepostas (ex: concentração de cloretos em amostras de uma zona contaminada e de uma zona não contaminada de um aquífero) (Knodel et al., 2007). Esta informação também é importante para ajudar na escolha do método estatístico que melhor se aplica à população em estudo.

Em estatística uma variável apresenta distribuição log-normal quando o seu logaritmo tem distribuição normal. Assim sendo, e partindo do pressuposto que as concentrações dos elementos possuem uma distribuição log-normal, Lepeltier descreveu um método estatístico para a determinação de *background* geoquímico (Lepeltier, 1969). Ao projectar as frequências acumuladas vs a concentração do elemento (em escala bi-logaritmica) um desvio da distribuição log-normal pode ser percebido como uma inflexão na parte superior da curva, representando o limite entre

anomalia e *background* (Lepeltier, 1969; Matschullat et al., 2000). Este ponto de inflexão é representado numericamente pelo valor $\bar{x} + 2\sigma$ da população. A inclinação da curva, representada pela seta na Figura III.23, divide o conjunto de dados do exemplo em duas partes: $<30\text{mg/kg}$ são valores de *background*, $>30\text{mg/kg}$ são valores anómalos. Torna-se claro que este método só é válido para um grande conjunto de dados, uma vez que no caso da existência de poucos dados esta inclinação da curva pode ser difícil de descrever de forma inequívoca.

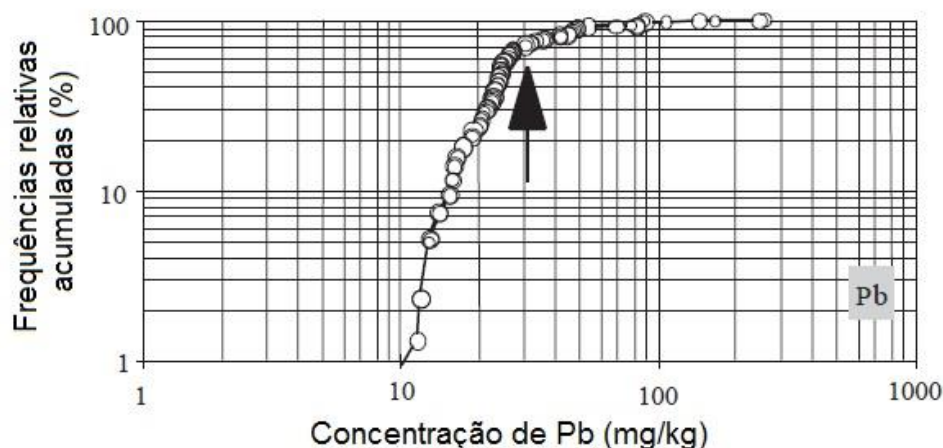


Figura III.23 – Ilustração do método de Lepeltier. A seta aponta para o ponto de viragem entre os dois conjuntos de dados (adaptado de Matschullat et al., 2000).

Para utilizar um método estatístico que seja mais objectivo e que possa ser aplicável a diferentes populações de dados foram pesquisados outros métodos, tendo sido escolhidos os métodos *Iterative 2σ* e *Calculated distribution function* descritos por Matschullat et al. (2000).

De uma forma geral os métodos empíricos usados para determinar a fronteira entre a anomalia e o *background* de uma população dependem do conhecimento muito especializado do comportamento dos elementos e não estão livres de critérios de decisão subjectivos e de experiência. No caso dos ambientes geológicos existem variações ao nível de litologia, estado de alteração, porosidade, hidrogeologia, e contaminantes. Por esse motivo esta abordagem não foi utilizada neste estudo. Por outro lado, os métodos estatísticos são objectivos na determinação do limite anomalia/*background*. No entanto a maioria dos testes estatísticos são apenas úteis para eliminar os chamados outliers. A comunicação exclusiva de qualquer valor médio sem o seu desvio padrão é de pouco uso, e só pode ser usado em comparação com outros métodos. Faz sentido, no entanto, mostrar as gamas de concentração (ex: o

intervalo normal de uma amostra, definido pela $\bar{x} \pm 2\sigma$, significa que cerca de 95% das amostras estão dentro desse intervalo) ou valores superiores, como o *threshold* (ex: $\bar{x} + 2\sigma$ significa que cerca de 97% das amostras estão abaixo deste valor). Apenas este tipo de dados inclui informação suficiente sobre a dispersão natural do background (Matschullat et al., 2000).

Métodos baseados em modelos objectivos, como os métodos *Iterative 2σ* e *Calculated distribution function* diferem dos métodos subjectivos, pois os valores limiar são definidos pelos dados em vez de serem definidos por uma decisão arbitrária do investigador (Sinclair, 1991). Ambos os métodos visam a definição dos valores de *background* e *threshold* por aproximação à normalidade. Estes métodos usam um conjunto real de dados e processam-nos (removendo dados) até que uma distribuição normal seja obtida (Nakic et al., 2007). Os dois métodos são aplicáveis a distribuições unimodais e distribuições enviesadas. O método *Calculated distribution function* é ainda aplicável a distribuições polimodais se os dados da população background, que representa os valores mais baixos da distribuição original do conjunto de dados, forem dominantes. No entanto ambos os métodos podem ser aplicados a distribuições dispersas se o teste de normalidade de Lilliefors (T) for inferior ao valor de Tcrítico definido por Lilliefors (1967).

A principal vantagem destes dois métodos em relação a outros é o facto de calcularem o intervalo normal dos valores de *background* (o verdadeiro valor de *background* está dentro do intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$, com 95% de confiança). Para o sucesso na aplicação destes métodos não é necessário que os dados na sua totalidade estejam distribuídos de forma normal ou log-normal, nem que o número total de dados seja muito elevado, pois estes métodos podem ser aplicados a um conjunto relativamente pequeno de dados (>30), o que lhes confere vantagens também em relação a outros métodos.

As limitações no uso destes métodos estão relacionadas com o facto de ambos funcionarem bem apenas quando os dados de *background*, geralmente predominantes, são usados para definir populações de *background*. Se o número de amostras contaminadas for igual ou superior ao número de amostras de *background*, o teste de normalidade de Lilliefors é superior ao valor de Tcrítico e o intervalo de *background* é sobrestimado (Nakic et al., 2007).

Nakic et al. (2007) criaram uma macro do Visual Basic designada BACKGROUND, utilizando algoritmos baseados nos métodos *Iterative 2σ* e *Calculated distribution function*. O algoritmo baseado no método *Iterative 2σ* (Nakic et al., 2007) consiste em:

1. Preparar os dados (armazenamento dos dados em colunas próprias);
2. Calcular a \bar{x} e o σ a partir do conjunto de dados inseridos;
3. Calcular o intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$;
4. Os dados são inspeccionados para ver se todos os valores estão dentro do intervalo calculado. Todos os valores que se encontrem fora do intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$ são eliminados;
5. Os passos anteriores são repetidos até que todos os valores se encontrem dentro do intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$;
6. Os valores de *background* ($\bar{x} \pm 2\sigma$), o limite *threshold* e os dados anómalos aparecem então na folha excel;
7. A macro calcula o intervalo (bin), as frequências relativas e acumuladas para os valores originais e para os valores calculados. Estes valores serão usados posteriormente para a apresentação de histogramas;
8. A macro calcula a distribuição cumulativa normal para a \bar{x} e o σ calculados e utiliza o teste de Lilliefors (para nível de significância $\alpha=0.5$) para testar o ajuste a uma distribuição normal (Lilliefors, 1967);
9. No último passo a macro produz um gráfico mostrando histogramas dos valores de background (originais e calculados), da distribuição cumulativa (original e calculada) e da distribuição cumulativa normal. Os valores estatísticos do teste de Lilliefors aparecem também na folha excel.

O algoritmo baseado no método *Calculated distribution function* (Nakic et al., 2007) partilha o primeiro passo do método *Iterative 2σ* seguindo-se:

- Cálculo da mediana para o conjunto de dados inseridos, e todos os valores acima da mediana são apagados;
- A macro espelha todos os valores restantes contra o valor calculado da mediana da seguinte forma: valor espelhado = mediana – valor definido + mediana = mediana + |mediana-valor definido|;
- Cálculo da \bar{x} e do σ e do intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$;
- Todos os valores que se encontrem fora do intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$ são eliminados;
- Seguem-se os mesmos passos utilizados no algoritmo anterior (passos 5 a 9).

De uma forma geral, pode dizer-se que recorrendo aos métodos *Iterative 2 σ* e *Calculated distribution function* descritos por Matschullat et al. (2000) e aplicados por Nakic et al. (2007), todos os valores além $\bar{x} \pm 2\sigma$ vão sendo removidos, até que se obtenha uma distribuição normal. Assim sendo, o que resta nos dados normalmente distribuídos é background, e o que é removido são anomalias.

Adaptando esta metodologia aos dados geofísicos obtidos através dos perfis de resistividade efectuados poderemos aferir se estas duas formas de abordagem nos indicam a mesma anomalia.

Com a realização dos perfis de resistividade procurou-se obter um conjunto de dados representativos da área em estudo para obter valores de background fidedignos. Para aplicar os métodos *Iterative 2 σ* e *Calculated distribution function* aos dados geofísicos, utilizaram-se os valores de condutividade, pois valores elevados de condutividade indicam a presença de anomalias positivas, da mesma forma que acontece com os dados geoquímicos. Depois de processados, os dados foram novamente convertidos sob a forma de resistividade, para poderem ser interpretados.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1. TRATAMENTO DE DADOS E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

IV.1.1. MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO INDUTIVO

Apesar da informação obtida pelo método EM não ter sido efetuada em toda a área de estudo, devido às limitações anteriormente descritas (secção III.1.2.2.), optou-se pela sua inclusão no capítulo dos resultados de forma a poder ser comparada com a informação obtida pelo método da RE. Pretende-se com isto encontrar uma ligação entre as duas tipologias de dados que nos permitam esclarecer eventuais dúvidas na criação do modelo final para a área de estudo.

Assim sendo, para a projeção a 2D dos dados adquiridos com os equipamentos EM-31 e FDEM-8 foi utilizado o programa SURFER. Combinando os dados para todas as frequências foi possível criar uma pseudo-secção para cada perfil. 76.2mS/m (13.1Ω.m)

No caso do perfil realizado com o equipamento EM-31, perfil EMt, apesar de apenas conseguirmos atingir a profundidade de 6m, é possível verificar que a condutividade vai aumentando com a profundidade naquele local. A zona menos condutiva (4.4mS/m; 227.3Ω.m) assinalada na figura IV.1 representa um corpo mais resistivo localizado a pouca profundidade, possivelmente um pequeno bloco granítico alterado.

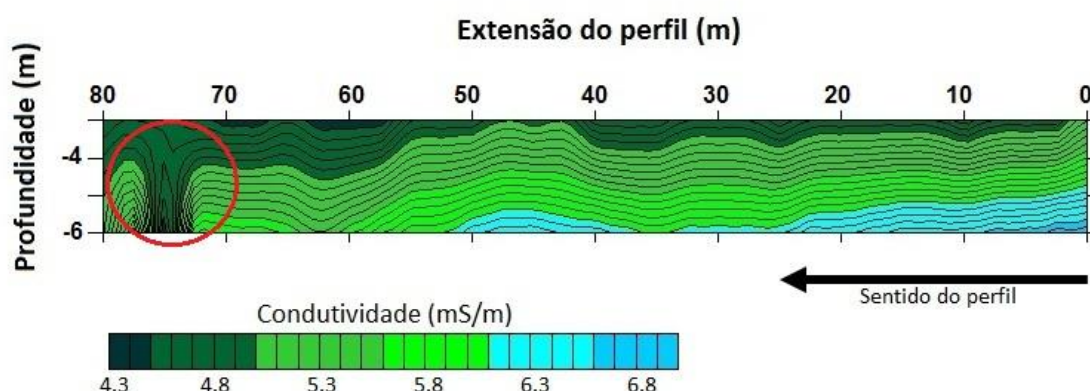


Figura IV.1 – Pseudo-secção de condutividade do perfil EMt. O círculo vermelho indica uma zona menos condutiva, provavelmente associada à presença de um pequeno bloco granítico alterado.

Os resultados obtidos nesta pseudo-seção estão de acordo com o observado no perfil de resistividade 12, onde se identifica uma zona mais resistiva no mesmo local (com cerca de $220\Omega.m$) e onde se observa uma tendência geral de diminuição dos valores de resistividade com a profundidade (Fig. IV.2).

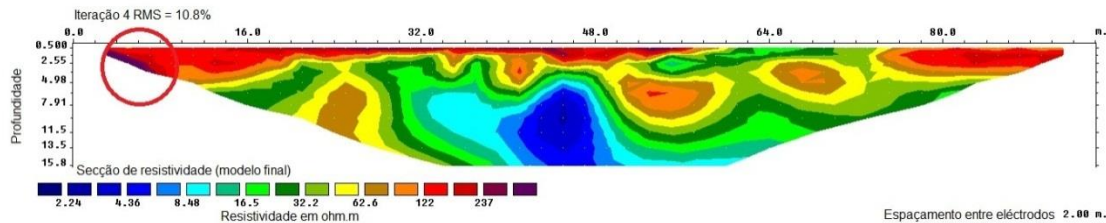


Figura IV.2 – Seção de resistividade relativa ao perfil 12, realizado segundo o método da resistividade elétrica. O círculo vermelho indica uma zona mais resistiva relacionada com o círculo da figura IV.1.

Conforme referido anteriormente a utilização do equipamento EM-31 conferia limitação de investigação em profundidade, assim foram efetuados 5 perfis com o equipamento FDEM-8 para obter informação a maiores profundidades. Apesar da impossibilidade de converter os valores obtidos com este equipamento em valores de condutividade e profundidade real, é possível, pela análise qualitativa das 5 pseudo-seções verificar a existência de 4 zonas (Fig. IV.3).

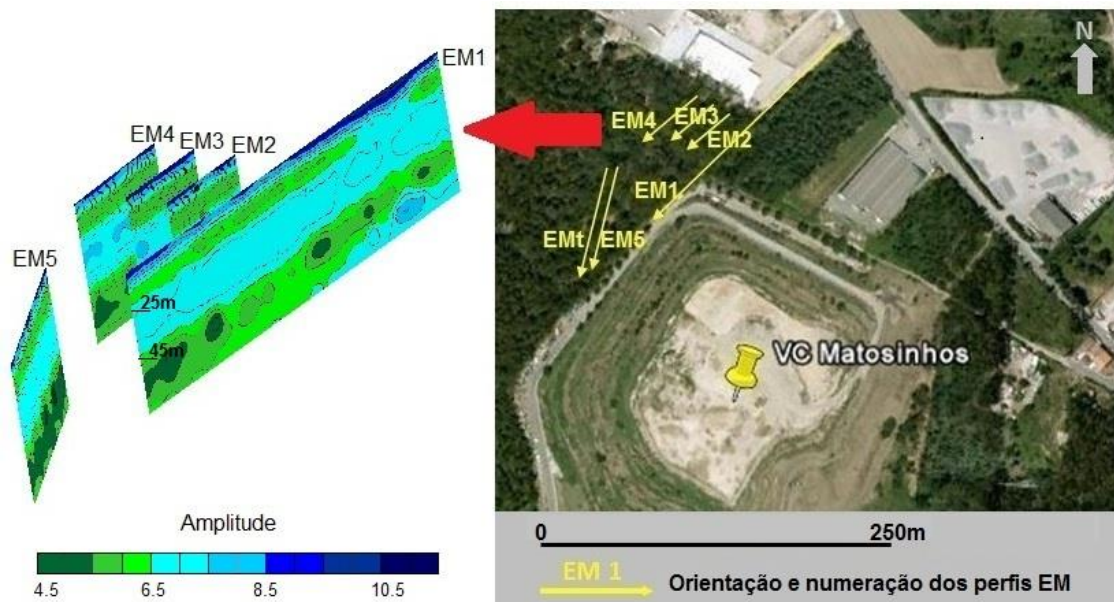


Figura IV.3 – Pseudo-seções dos perfis EM1, EM2, EM3, EM4 e EM5 (esquerda); Localização de todos os perfis realizados com o método EM (direita).

Até aos 15m de profundidade aproximada observam-se valores mais altos de amplitude, possivelmente associados a materiais com alguma contaminação, havendo um decréscimo de amplitude entre os 15 e os 25m, relacionado provavelmente com o aparecimento de rocha. Segue-se um aumento dos valores de amplitude entre os 25 e os 45m, possivelmente uma zona granítica mais fraturada, a partir dos 45m os valores de amplitude decrescem possivelmente pelo aparecimento de uma zona granítica não alterada. Com a realização destes perfis foi possível observar que estas zonas se mantêm nos 5 perfis, independentemente do seu afastamento ao VC, o que pode indicar uma uniformidade em termos do contexto geológico do local.

Os perfis de resistividade realizados na mesma área corroboram esta descrição até cerca dos 25m de profundidade. No perfil de resistividade 7 (Fig. IV.4) é possível observar que até aos 15m são encontrados valores baixos de resistividade indicativos de materiais contaminados e rocha alterada, e abaixo dos 15m encontram-se valores indicativos de rocha alterada (230 a 1200 Ω .m).

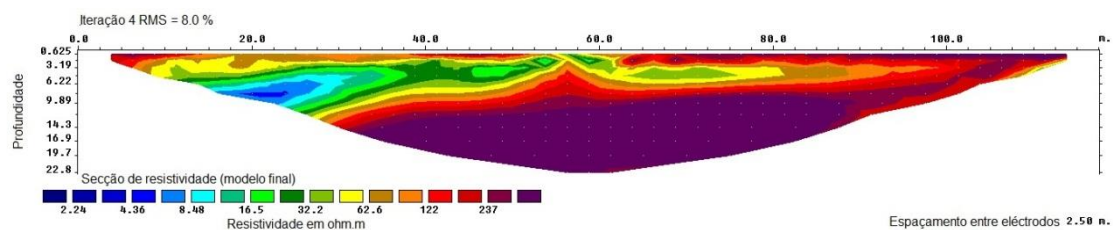


Figura IV.4 – Secção de resistividade relativa ao perfil 7, realizado segundo o método RE.

A estratégia de cessar a utilização de métodos EM e passar para a utilização do método RE em toda a área de estudo ocorreu devido a algumas limitações dos métodos EM relativamente ao método RE. Os métodos EM têm resolução inferior, permitindo obter valores para poucos níveis de profundidade (função da frequência, da orientação da bobine e do terreno) sendo também mais sensíveis à presença de materiais condutores, os quais já foram retratados como relativamente abundantes e distribuídos pela área de estudo. Devido às combinações de quadri-eléctrodos que podem ser definidas, o método RE permite obter maior resolução tanto lateralmente como em profundidade. O facto de não ser sensível à existência de objectos metálicos à superfície e permitir a conversão directa dos valores obtidos em valores de resistividade eléctrica torna-se também uma vantagem em relação ao método FDEM.

IV.1.2. MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Como os valores obtidos inicialmente numa campanha de prospeção geofísica elétrica são valores, não da resistividade real mas sim da resistividade aparente, é necessário, utilizar uma técnica de inversão dos dados colhidos no campo. Para tal utilizou-se o método de inversão através de mínimos quadrados (*Least-squares inversion*) do algoritmo do programa RES2DINV (Loke, 2004). Este método resulta bem em locais onde se observa uma variação gradual dos limites geológicos presentes em profundidade, assim como no caso da difusão de plumas de contaminação (Loke, 2004). A forma matemática para a aplicação deste método é dada pela equação IV.1:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q = J^T g \quad (\text{Eq. IV.1})$$

Onde:

g – vetor discrepância

J – matriz Jacobiana

J^T – transposta de J

λ – factor de amortecimento

I – matriz identidade

Δq - vetor de mudança dos parâmetros

No processo de inversão pelo método dos mínimos quadrados, foram utilizadas as definições padrão do RES2DINV (Loke, 2004), nomeadamente: aplicação do método “*smotheness constraint*” nos valores de resistividade do modelo final; cálculo da matriz Jacobiana em cada iteração; método de optimização padrão de Gauss-Newton; modelo inicial de semi-espaco homogéneo. Pelo método dos mínimos quadrados, através de iterações, é calculado um modelo para o terreno cuja resposta sintética, segundo o mesmo dispositivo de campo, seja a mais próxima possível em relação ao que efectivamente foi medido no campo, minimizando assim ao máximo o erro associado à diferença entre os mesmos. A aplicação deste método permite então obter um modelo final da distribuição da resistividade do perfil em função da profundidade (Loke, 2004) ou seja uma secção bidimensional vertical (Fig. IV.5). O erro, definido como RMS (*Root Mean Square*) no programa, representa assim a diferença entre os pontos originais, da pseudo-secção, e os novos pontos, calculados pelo processo de transformação na pseudo-secção sintética.

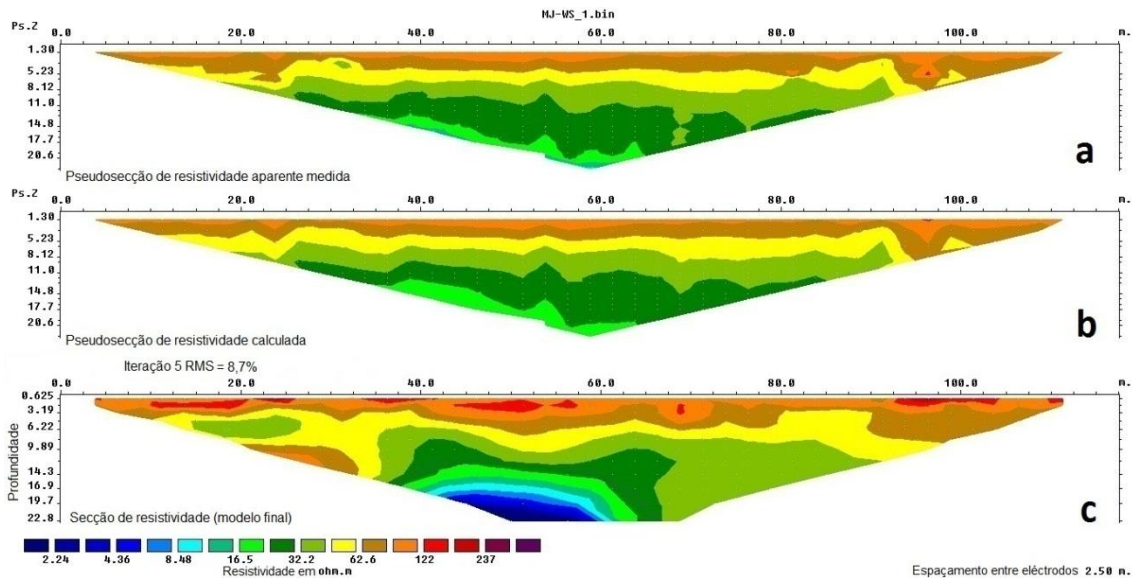


Figura IV.5 - Modelação dos dados de resistividade do perfil 1 usando o programa RES2DINV: a – pseudo-secção de resistividade aparente medida; b – pseudo-secção de resistividade calculada; c – secção de resistividade (modelo final).

Este erro pode estar associado à existência de dados de campo incorretos. Esses dados ocorrem devido a ruídos na aquisição dos dados que podem ser sistemáticos ou aleatórios (Loke, 2004). O ruído sistemático pode ocorrer devido a alguma falha durante o processo de aquisição dos dados, nomeadamente quebras nos cabos, mau contacto entre os eléctrodos e o terreno de tal forma que a corrente não é injectada no terreno, esquecimento na ligação de um eléctrodo ao cabo, etc. Este tipo de ruído é fácil de detectar num grande conjunto de dados, uma vez que está normalmente presente num pequeno número de leituras, e os valores incorrectos destacam-se bastante dos restantes (Loke, 2004). O ruído aleatório inclui efeitos como as correntes telúricas que afectam todas as leituras originando dados com valores maiores ou menores do que os seus equivalentes sem ruído (Loke, 2004). Este tipo de ruído é geralmente mais comum com arranjos como o Dipolo-Dipolo, e foi também o que se verificou na área de estudo aquando da escolha do tipo de arranjo de eléctrodos mais adequado. Quando foi experimentado o arranjo Dipolo-Dipolo verificou-se que existia um ruído elevado que criava no modelo final um erro RMS consideravelmente maior do que no caso do arranjo Wenner-Schlumberger, que viemos a adotar.

Para evitar que estes valores afetem a correta transformação dos dados é possível utilizar uma opção do programa, designada por *exterminate bad datum points*, que permite removê-los manualmente antes de efectuar o processo de inversão (Fig. IV.6).

Sempre que tal aconteceu, essa opção foi utilizada de forma a manter a consistência dos dados em toda a área de estudo.

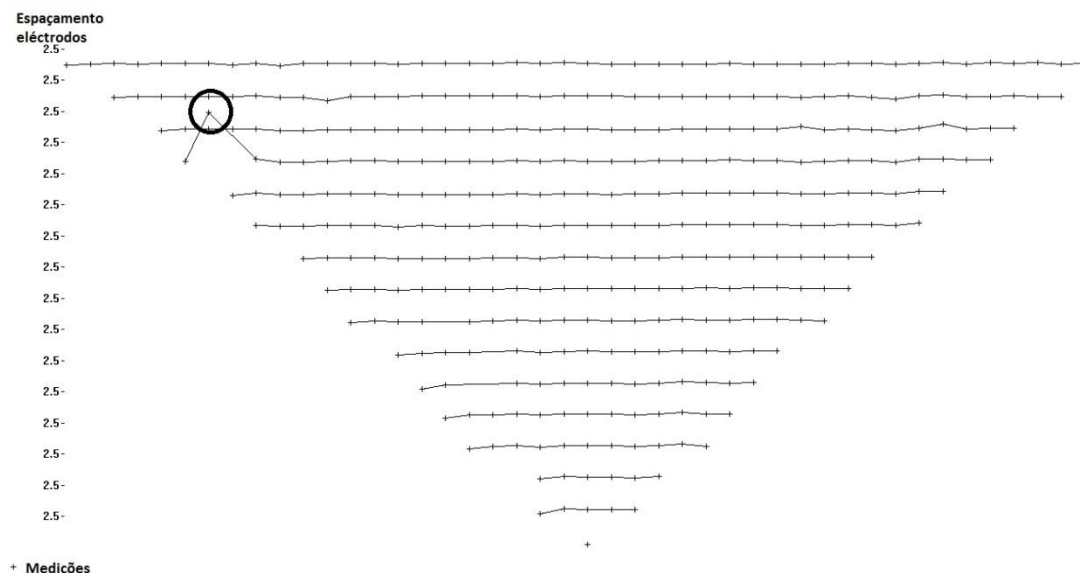


Figura IV.6 – Opção *exterminate bad datum points* do programa RES2DINV: o círculo assinala um dado errático que pode ser removido através desta opção.

Quando o ruído é de natureza aleatória, ou existe um elevado número de dados com erro, nem sempre é viável a utilização desta opção, assim sendo existem outras formas de poder reduzir o erro. Após a inversão dos dados é possível utilizar a opção *RMS error statistics*, que mostra a diferença percentual entre os logaritmos dos valores de resistividade aparente medidos e calculados, sob a forma de um gráfico de barras (Loke, 2004). Os dados com elevado erro podem ser removidos directamente no próprio gráfico pelo afastamento do cursor para a esquerda da barra do gráfico onde esses valores se incluem. Esta opção foi experimentada nos perfis de resistividade 28 a 32 de forma a minimizar o erro obtido.

Com as secções de resistividade obtidas para todos os perfis de resistividade realizados foi possível identificar zonas com valores anómalos de resistividade. A caracterização destas zonas anómalas como zonas contaminadas baseou-se nos critérios definidos por Fachin et al. (2006) e Meju (2006) para áreas contaminadas e na caracterização das resistividades características dos resíduos de McCann (1994) e Bernstone et al. (2000).

Fachin et al (2006) definiram: área contaminada – com resistividades inferiores a $30\Omega.m$; área suspeita de contaminação – com resistividades compreendidas entre 30 e $50\Omega.m$; área não contaminada – com resistividades superiores a $50\Omega.m$.

Como os locais de deposição de resíduos são uma mistura complexa de depósitos antropogénicos, as suas propriedades físicas apresentam uma vasta gama de variação (Meju, 2006). Estão publicados valores de resistividade típicos de resíduos sólidos e do substrato contaminado, entre 1.5 e $20\Omega.m$ (Knight et al 1978; Laine et al 1982; Carpenter et al 1991; Meju 2000), que estão associados a lixiviados muito condutivos (Whiteley & Jewell, 1992; Meju, 2000).

Segundo McCann (1994) a resistividade típica de uma massa de resíduos pode variar entre 15 e $30\Omega.m$, num meio saturado, ou entre $30-70\Omega.m$ num meio não saturado. Contudo certos materiais presentes numa massa de resíduos podem aumentar ou diminuir ainda mais os valores de resistividade (Bernstone et al., 2000). Os metais, as cinzas resultantes da incineração de plantas, os restos de cortes de árvores e os têxteis (quando conseguem reter a humidade), os resíduos previamente tratados e os produtos químicos dão origem a resistividades baixas, no entanto plásticos, borracha, certo tipo de entulho resultante da demolição de edifícios, lixo preservado dentro de sacos plásticos, jornais muito compactados e químicos orgânicos (hidrocarbonetos como o xileno, $\rho=7 \times 10^6\Omega.m$) têm resistividades muito elevadas (Bernstone et al., 2000).

Para uma avaliação preliminar da contaminação na área de estudo foram tidos em conta os critérios anteriormente descritos, os valores anómalos de resistividade publicados em diversos estudos desta natureza e o conhecimento prévio sobre os materiais geológicos presentes no local. Com o cruzamento desta informação com os valores de resistividade obtidos pelo método da RE nos perfis 1 a 27, foi possível a identificação e delimitação das plumas de contaminação provenientes do VC de Matosinhos (Fig. IV.7), tendo sido definidas:

- Áreas onde se encontrem valores de resistividade inferiores a $30\Omega.m$ foram consideradas contaminadas;
- Áreas onde os valores de resistividade estão compreendidos entre 30 e $200\Omega.m$ foram consideradas pouco contaminadas;

- Áreas onde os valores de resistividade são superiores a $200\Omega.m$ foram consideradas não contaminadas.

No entanto, o objectivo da criação de um modelo final para a área de estudo prevê a integração da informação obtida por métodos de prospecção geofísica com o conhecimento alcançado através do tratamento estatístico da totalidade dos valores de resistividade, bem como com o apoio dos resultados das análises físico-químicas realizadas na água subterrânea. Deste modo, esta é uma primeira abordagem do problema da contaminação, que será refinada com a inclusão das restantes informações que irão permitir a construção de um modelo do terreno o mais aproximado possível da realidade.

Optou-se por esquematizar a interpretação da pluma de contaminação na área de estudo para uma profundidade média de 5m (Fig. IV.7).

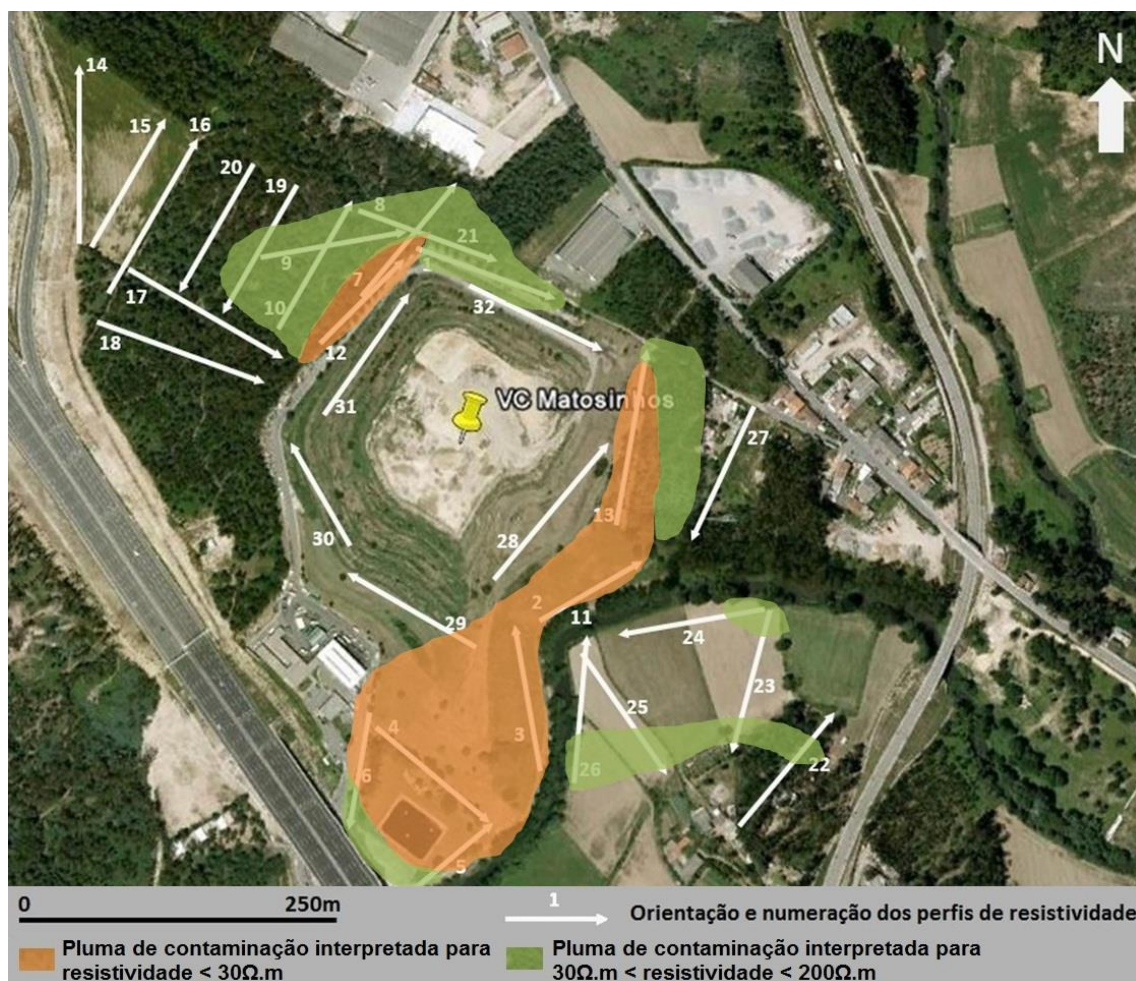


Figura IV.7 – Esboço preliminar das plumas de contaminação na área de estudo, para uma profundidade média de 5m.

Na figura IV.8 estão ainda representadas as secções de resistividade relativas a todos os perfis de RE efectuados na área de estudo.

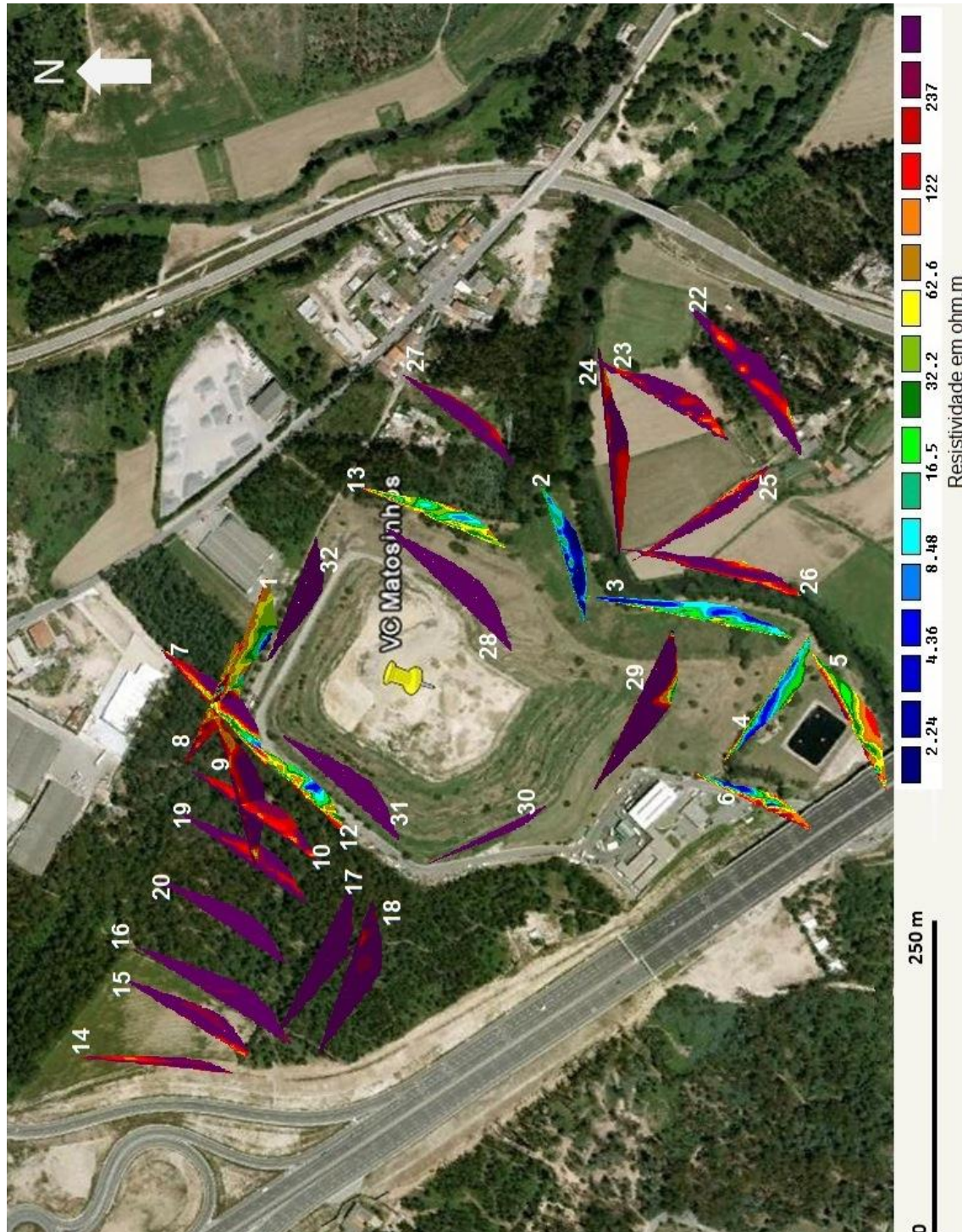


Figura IV.8 – Esquema representativo das secções de resistividade obtidas na área de estudo, relativas aos perfis de RE localizados na Fig. IV.7.

Em seguida apresentam-se algumas dessas secções com maior pormenor, aquelas que pelos valores de resistividade obtidos permitem representar melhor certos aspectos que se pretendem salientar.

Foram identificadas duas zonas com valores anómalos de resistividade, que estão associados à contaminação oriunda do VC de Matosinhos. Na zona Norte do VC identificou-se uma área considerada contaminada, com pouca extensão. Com o afastamento ao VC verifica-se que os valores de resistividade vão aumentando, passando-se para uma área pouco contaminada e em seguida para uma área sem evidências de contaminação (Fig. IV.7, IV.8 e IV.9).

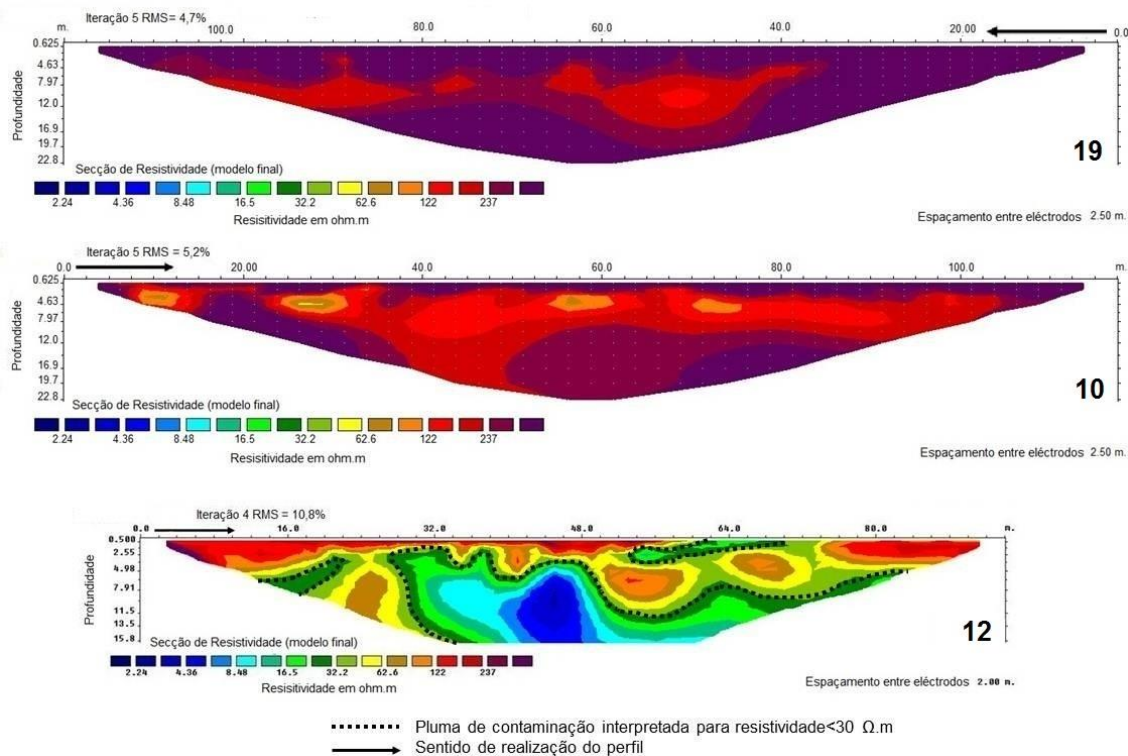


Figura IV.9 – Secções de resistividade relativas aos perfis 12 (mais próximo do VC), 10 e 19 (mais afastado do VC), que mostram a pluma de contaminação a Norte e a sua atenuação à medida que aumenta o afastamento ao VC.

Nas zonas Sul e Este do VC identificou-se uma outra área contaminada (Fig. IV.7), bastante mais extensa que a da zona Norte, com valores de resistividade ainda mais baixos, muitas vezes inferiores a $8\Omega.m$. Os valores encontrados nesta área são o reflexo da área adjacente do VC que não se encontra impermeabilizada. Esta pluma estende-se para Sul e verifica-se igualmente o aumento dos valores de resistividade com o progressivo afastamento ao VC, ou seja a contaminação atenua-se com o

afastamento ao VC (Fig. IV.7, IV.8 e IV.10). Devido à sua extensão, à sua proximidade ao rio Leça e à grande quantidade de valores baixos de resistividade, esta contaminação é mais significativa do que a da zona Norte.

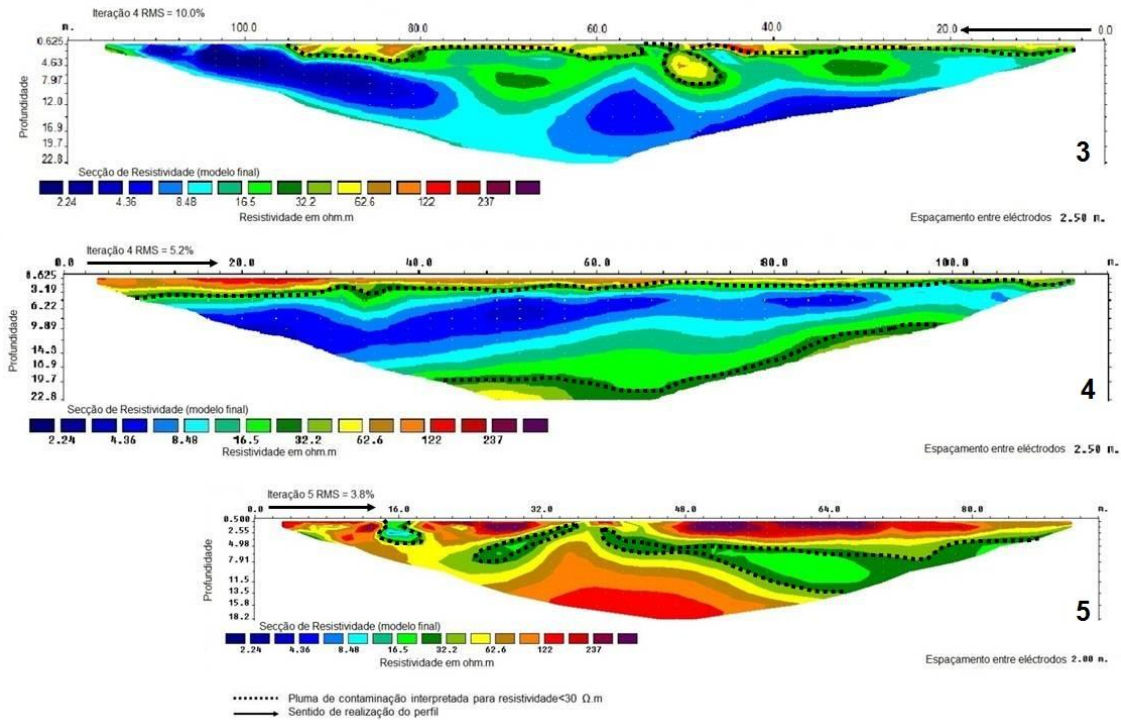


Figura IV.10 – Perfis de resistividade 3, 4 e 5 que mostram a pluma de contaminação a Sul e a sua atenuação à medida que aumenta o afastamento ao VC.

Pela análise da figura IV.7 verifica-se que o rio Leça parece estar a funcionar como uma barreira à contaminação, uma vez que na outra margem do rio não foram detectadas áreas contaminadas. No entanto conforme é visível na secção de resistividade do perfil 25, localizado na margem sul do rio (Fig. IV.11), identifica-se uma zona superficial (que atinge os 7-8m de profundidade, nos extremos do perfil) e outra mais profunda (cerca dos 20-22m de profundidade, no centro do perfil) com valores de resistividade compreendidos entre 30 e 200Ω.m.

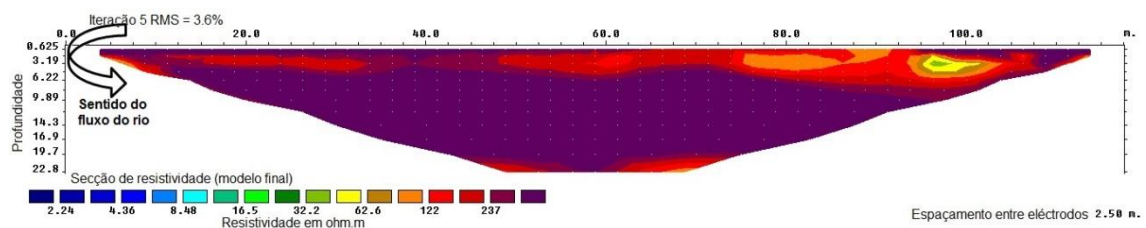


Figura IV.11 – Secção de resistividade relativa ao perfil 25, realizado segundo o método RE.

De salientar que esta é uma área agrícola com algumas habitações que não se encontram ligadas à rede de saneamento. Assim sendo, esses valores de resistividade podem estar relacionados com descargas de águas residuais domésticas, com a utilização da água do rio para rega dos campos de cultivo ou com a presença no solo de compostos resultantes da actividade agrícola (fertilizantes e pesticidas), e não com a contaminação proveniente do VC.

O rio Leça pode igualmente ter vindo a funcionar ao longo dos anos como um veículo de dispersão desta contaminação para locais a jusante da área de estudo, no entanto não foi possível comprová-lo neste estudo geofísico, uma vez que não foram efectuados perfis de RE fora da área de estudo. No entanto, existem dados de análises de água que permitem comparar os valores obtidos a montante e a jusante do VC de Matosinhos que serão analisados posteriormente (subcapítulo IV.1.4).

Relativamente aos perfis 28 a 32, que foram efectuados no topo da massa de resíduos (Fig. IV.7), a sua análise foi efectuada separadamente uma vez que se trata de uma zona distinta onde foram encontrados valores de resistividade muito elevados. Estes valores poderão estar relacionados com o material utilizado na cobertura colocada para confinar a massa de resíduos (geomembrana de PEAD e geotêxtil). Com estes perfis foi possível identificar as duas zonas que compõe o VC de Matosinhos, as camadas de cobertura da massa de resíduos e o início da zona contaminada imediatamente abaixo da área do VC que não está impermeabilizada na base (Fig. IV.12).

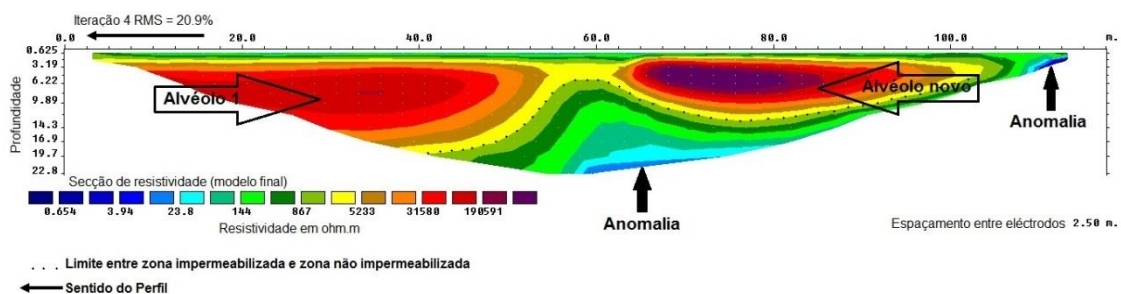


Figura IV.12 – Secção de resistividade relativa ao Perfil 29. Identificação do limite entre zona impermeabilizada e zona não impermeabilizada no VC de Matosinhos, alvéolos onde se depositaram resíduos e anomalia de resistividade.

Na secção de resistividade do Perfil 29 (Fig. IV.12) é possível distinguir entre as duas zonas que compõe o VC de Matosinhos. Acima do limite entre zona impermeabilizada

e zona não impermeabilizada (a tracejado na Fig. IV.12) encontra-se a zona que foi devidamente impermeabilizada na base e no topo, neste local encontram-se os resíduos que foram confinados no alvéolo 1 e os últimos resíduos recebidos que foram confinados no alvéolo novo. Abaixo desse limite (a tracejado na Fig. IV.12) encontra-se a zona dos resíduos mais antigos, que não foram removidos, referentes à antiga lixeira. Na base destes resíduos, devido à falta de impermeabilização, pode identificar-se a presença da anomalia de resistividade com valores inferiores a $30\Omega.m$. A continuação desta anomalia, pode ver-se no perfil 4, que tem a mesma direcção e que se localiza a uma cota inferior ao perfil 29, indicando assim a evolução da pluma de contaminação no sentido Sul (Fig. IV.8).

De uma forma geral os perfis não apresentam variações significativas em termos topográficos, no entanto no caso dos perfis 13 e 27 a diferença de cota entre o início e o fim do perfil é cerca de 14m e 17m respectivamente. Por esse motivo as secções destes dois perfis sofreram um processo de inversão com inclusão da topografia. No entanto as diferenças observadas nas secções com inversão incluindo a topografia e com inversão não incluindo a topografia são mínimas, motivo pelo qual não são aqui apresentadas em pormenor.

Para verificar a eventual evolução dos valores de resistividade ao longo do tempo foram efectuadas apenas duas campanhas geofísicas espaçadas no tempo, em dois locais teste da área de estudo. Na zona norte do VC, o perfil 8 de RE, realizado em março de 2010, foi repetido em março de 2011, obtendo-se a secção relativa ao perfil 21 (Fig. IV.13). Na zona sul, o perfil 2 de RE, realizado em fevereiro de 2010, foi repetido em outubro de 2010, obtendo-se a secção relativa ao perfil 11 (Fig. IV.13).

Entre as secções de resistividade dos perfis 8 e 21, realizados com um ano de intervalo, não se observa modificação significativa nos valores de resistividade, ocorrendo um aumento muito ligeiro dos valores de resistividade, sendo idêntica a localização dos sinais da pluma de contaminação (Fig. IV.13). Entre as secções de resistividade dos perfis 2 e 11, realizadas em estações do ano diferentes, verifica-se que há um ligeiro aumento dos valores de resistividade nos extremos da secção e uma ligeira diminuição dos valores de resistividade na parte central da secção, conduzindo a uma maior uniformidade da pluma em profundidade. De uma forma geral esses valores continuam a ser muito baixos e situados dentro do mesmo intervalo de resistividades.

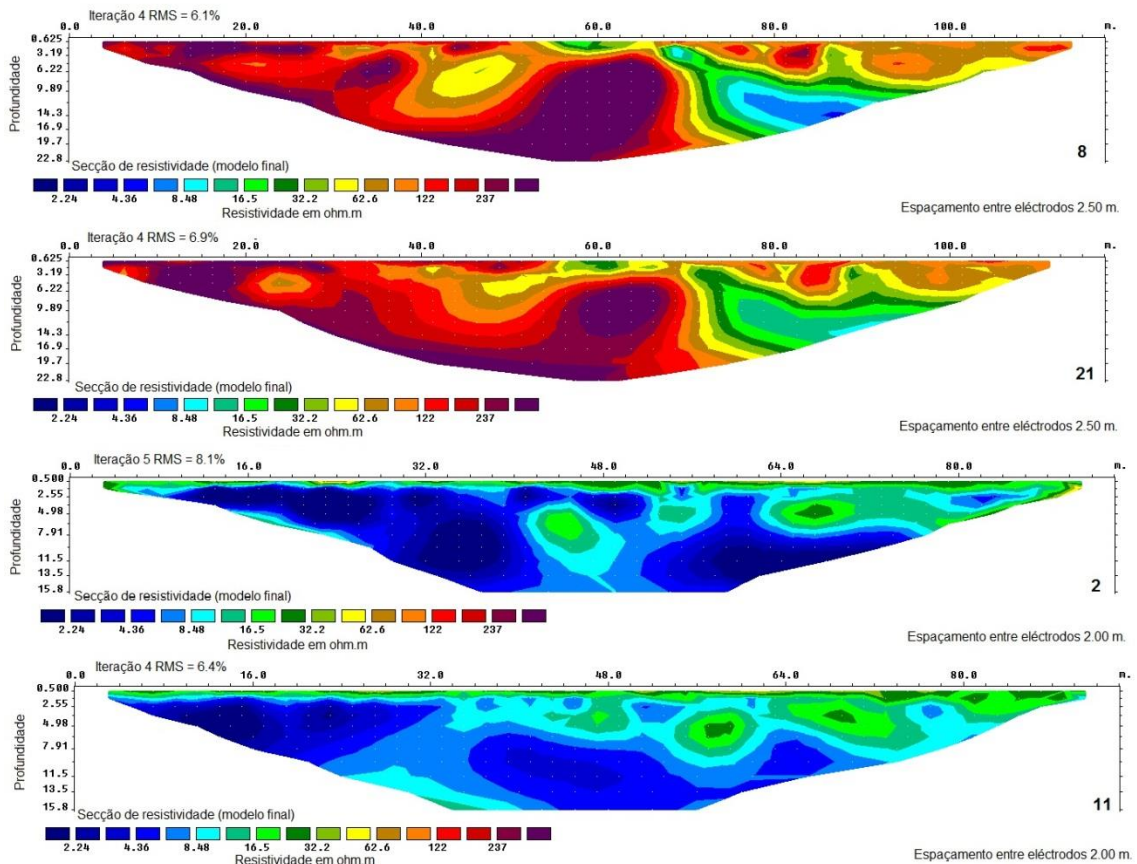


Figura IV.13 – Secções de resistividade relativas aos perfis 8 e 21, realizados respectivamente em março de 2010 e março de 2011. Secções de resistividade relativas aos perfis 2 e 11, realizados respectivamente em fevereiro de 2010 e outubro de 2010.

Foi também efectuada a inversão destes perfis recorrendo à opção Time-Lapse do RES2DINV (Kim et al., 2009; Kim, 2010; Rucker et al., 2011). Esta função permite harmonizar as condições de inversão entre perfis de RE idênticos mas de qualidade que pode ser ligeiramente variável. Assim sendo ao efectuar este tipo de inversão poderemos verificar se existem diferenças significativas entre os perfis de RE realizados em alturas diferentes.

Como se pode observar na Fig. IV.14 os valores obtidos nas duas campanhas não apresentaram diferenças consideráveis. Por esse motivo, decidiu-se que não seria relevante, para os objectivos propostos para este estudo, fazer uma segunda campanha em todos os locais anteriormente amostrados pelo método da RE.

As ligeiras diferenças observadas entre as secções 2 e 11 podem estar relacionadas com as diferenças climáticas existentes no período antecedente à recolha dos dados de resistividade. O período anterior à recolha dos dados da secção 2 foi um período mais chuvoso, associado a temperaturas mais baixas, enquanto o período que antecedeu a recolha de dados para a secção 11 foi um período mais seco com temperaturas mais altas (Fig. IV.15). No caso das secções 8 e 21, o período que antecedeu a sua realização foi semelhante em termos de temperaturas, no entanto em termos de precipitação foi menor no caso da secção 21 do que no caso da secção 8 (Fig. IV.15).

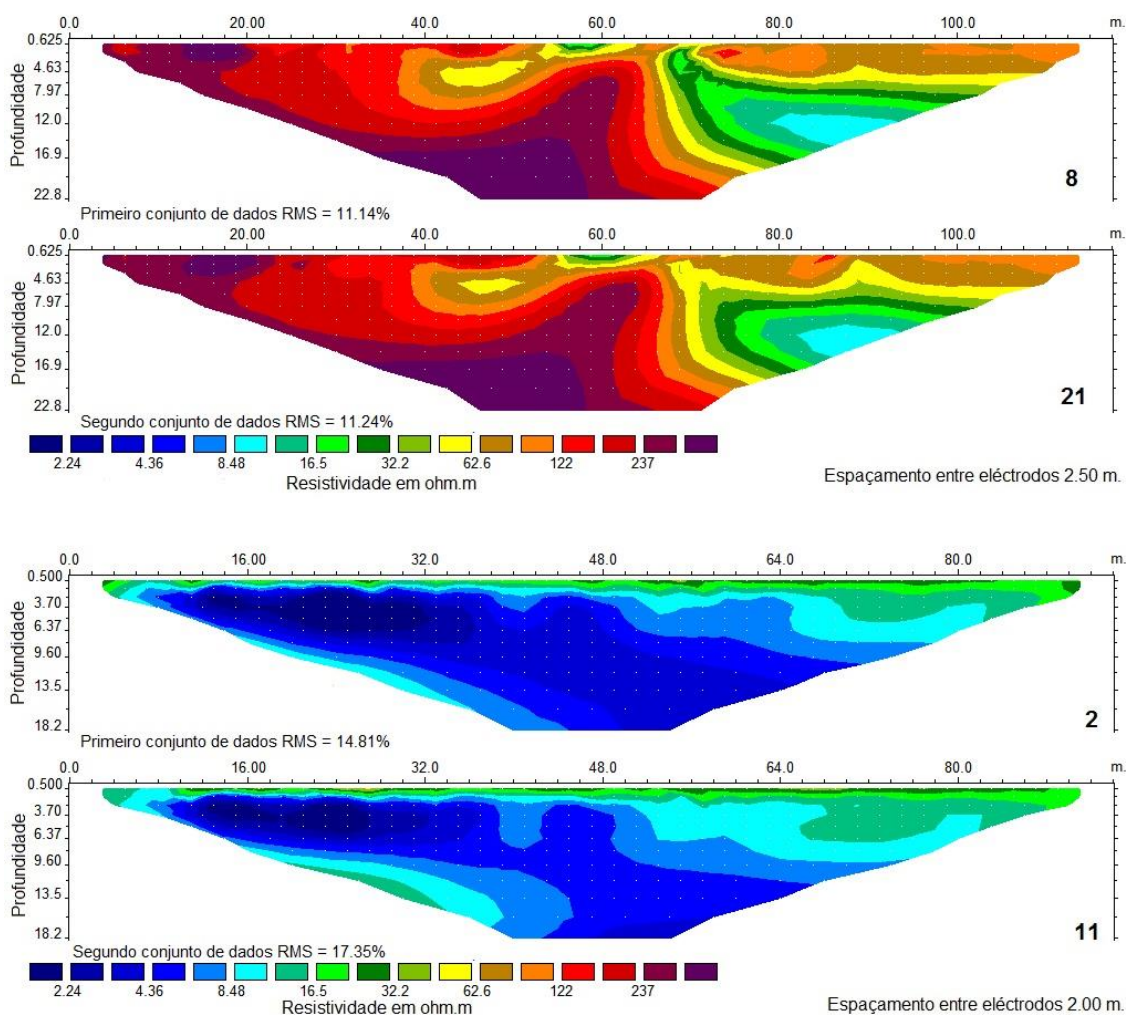


Figura IV.14 – Comparação das secções de resistividade relativas aos perfis 8 e 21, e aos perfis 2 e 11, com a opção de inversão Time-Lapse do RES2DINV.

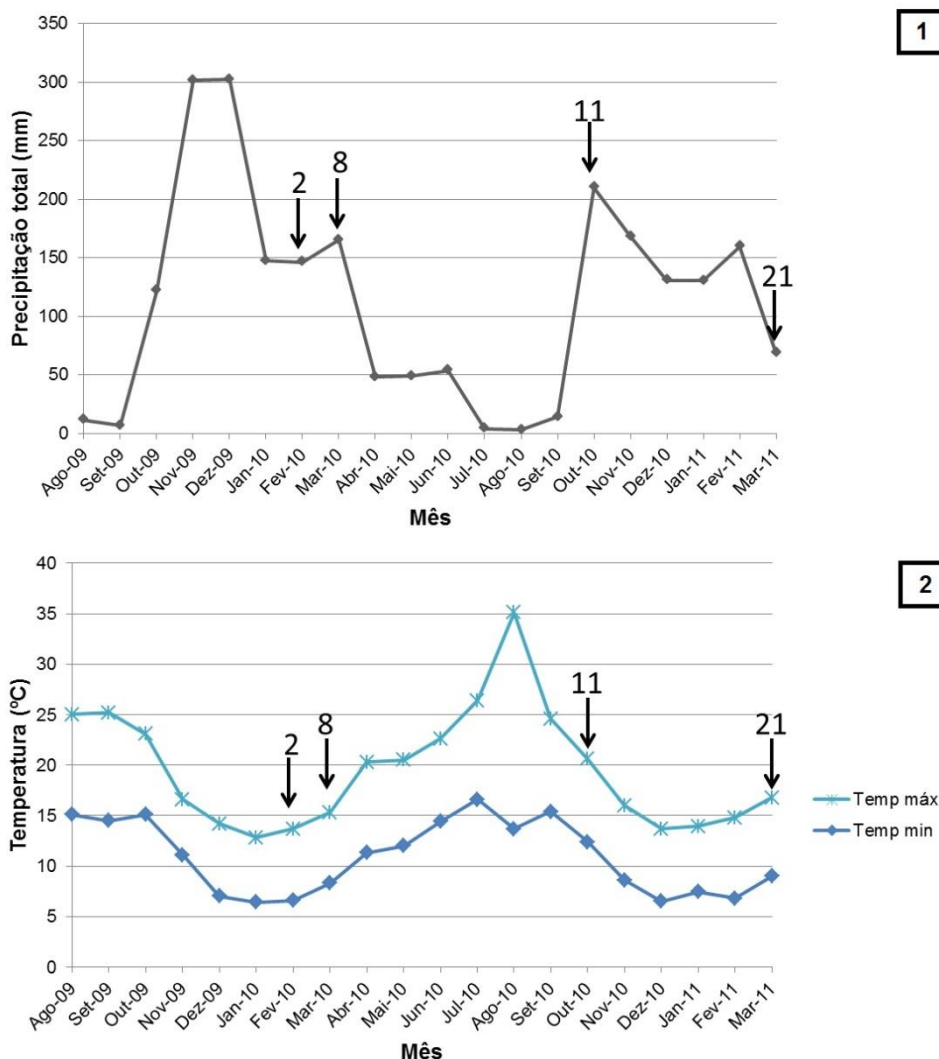


Figura IV.15 – Representação gráfica da variação da precipitação (1) e temperaturas máximas e mínimas (2) na estação climatológica de Porto - Pedras Rubras, com base nos relatórios climatológicos de agosto de 2009 a março de 2011, do instituto de meteorologia (<http://www.meteo.pt/>). As setas com os números 2, 8, 11 e 21 representam a data em que foram realizados os perfis de resistividade 2, 8, 11 e 21 respectivamente.

IV.1.3. MÉTODO DA REFRAÇÃO SÍSMICA E MASW

Os perfis de sísmica foram efectuados em dois locais onde já haviam sido colhidos dados pelo método da resistividade eléctrica (perfis de RE 1 e 4), com o objectivo de avaliar a competência dos materiais e de comparar as duas tipologias de dados indirectos. Por outro lado, existem também dados de sondagens mecânicas realizadas na parte sul do VC que podem ser comparados com os perfis sísmicos no mesmo local, de forma a comprovar a validade dos dados sísmicos.

Para a interpretação dos dados obtidos pelo método da refração sísmica (SR) utilizou-se a metodologia de *“Traveltime Tomography”* (Pullammanappallil & Louie, 1994). Para um determinado conjunto de tempos de chegada, fornece um resultado de erro mínimo e, ao contrário dos métodos de ajuste de rectas em dromocrónicas, não resulta em algumas das ambiguidades de interpretação, que são comuns nesta metodologia. A secção de velocidades de elevada resolução é adequada para meios cristalinos, aplicando-se de forma eficaz às situações em que esse meio evidencia um gradiente de alteração. O *software* que implementa esta técnica de inversão é o SeisOpt@2D o qual permite estabilizar numa solução final com baixo erro.

As soluções são encontradas através de um processo iterativo o qual visa modificar um modelo da terra, sintético, até ao ponto em que os tempos de propagação, que se obtém sobre este mesmo modelo, são iguais ou o mais próximo possíveis daqueles que foram interpretados nos registos de campo. A busca deste modelo de erro mínimo é feita através do algoritmo *“simulated annealing”* (Pullammanappallil & Louie, 1994).

Assim sendo foram obtidas duas secções de SR (Fig. IV.16) que revelam as diferenças em termos de velocidades das ondas P (V_P) nos dois locais. Pela análise das tomografias de SR referentes aos perfis S1, a norte do VC, e S2 a sul do VC, desde logo se observa uma camada, de maior espessura em S2, com V_P inferiores a 800m/s. Seguindo-se uma zona com V_P até aos 2000m/s, localizada a menor profundidade em S1 do que em S2. Por fim uma zona com V_P superiores a 2000m/s mais significativa em S1 e identificada a uma menor profundidade também em S1. Esta diferença poderá estar relacionada com a maior ou menor proximidade do maciço rochoso em relação à superfície do terreno, a qual se reflecte igualmente na diferença de cota entre os dois perfis. S1 (52m) situa-se a uma cota mais elevada que S2 (26m), estando o maciço rochoso mais próximo da superfície no caso de S1.

Será válido supor que em termos geomorfológicos a zona norte do VC se situa a cotas superiores às da zona sul, uma vez que o terreno não foi tão erodido, precisamente por se apresentar mecanicamente mais resistente. Assim sendo podemos considerar que o comportamento mecânico das formações geológicas condicionou a topografia actual, o que por sua vez poderá condicionar a migração de fluídos das zonas de cota superior para as zonas de cota inferior. Este facto é importante quando analisarmos a migração de fluidos contaminados, que se irão deslocar por acção da gravidade, das cotas superiores para as cotas inferiores.

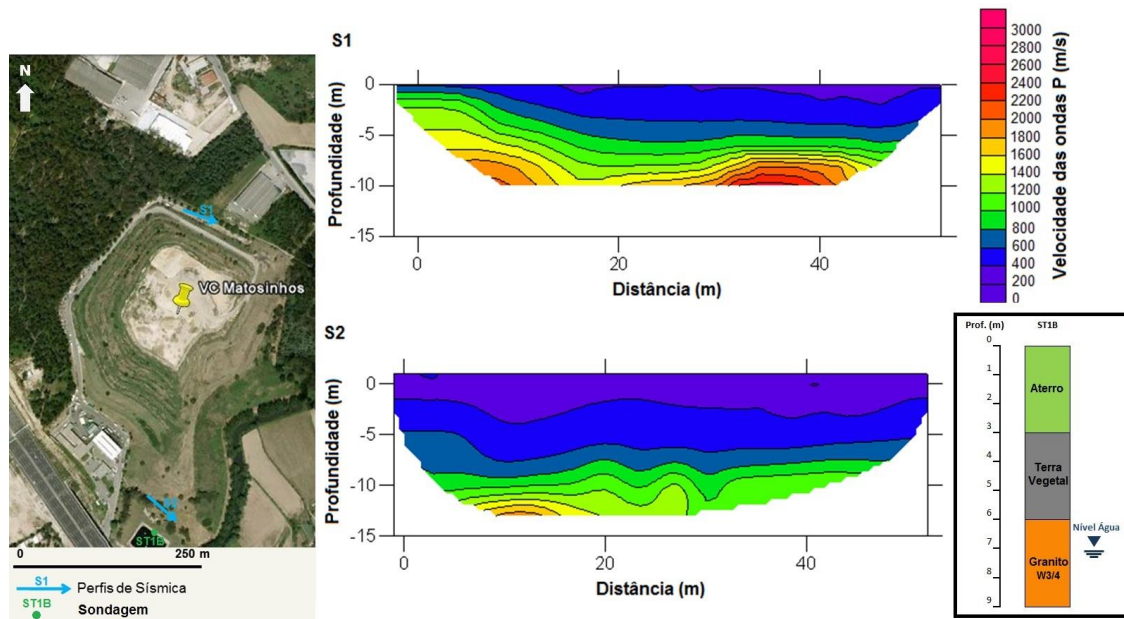


Figura IV.16 – Tomografias sísmicas obtidas pela inversão de dados obtidos pelo método da refração sísmica, S1 a norte do VC e S2 a sul do VC. Sondagem mecânica (ST1B) a sul do VC.

Entre os 7 e os 9m de profundidade, em S2, verifica-se um aumento de V_P , cujos valores se coadunam com a presença de rocha. Esta afirmação é corroborada pelas sondagens realizadas no mesmo local, que identificam a presença de rocha granítica a essa profundidade (ver, na Fig. IV.16, log da sondagem ST1B). Esta transição também foi observada nos perfis de ondas S obtidos pelo método MASW, cujos resultados serão abordados um pouco mais à frente.

Uma vez que nos dois locais onde se efectuaram os perfis de SR já tinham sido realizados perfis de RE, optou-se pela sua localização relativa a fim de comparar os dois tipos de dados (Fig. IV.17).

Na figura IV.17a compara-se a secção de RE 1 com a tomografia de SR S1. Verifica-se que em S1, até aos 10m de profundidade, as V_P vão aumentando gradualmente, atingindo valores típicos de granito com graus de alteração graduais ($1000\text{m/s} < V_P < 4600\text{m/s}$). No mesmo local, a secção de RE 1 indica também valores de resistividade mais elevados o que está de acordo com os dados das V_P obtidos pela SR.

Na figura IV.17b compara-se a secção de RE 4 com a tomografia de SR S2. Pode observar-se que os valores de resistividade mais baixos estão associados a V_P

inferiores a 800 m/s e à medida que os valores de resistividade vão aumentando em profundidade as V_P também aumentam. De salientar que a V_P característica dos resíduos urbanos varia entre 180m/s e 700m/s (ex.: Knight et al., 1978; Calkin, 1989; Sharma et al., 1999), dependendo do grau de compactação dos resíduos e do seu estado de saturação. Este facto está de acordo com os resultados de V_P obtidos e com os respectivos baixos valores de resistividade característicos da presença de resíduos urbanos.

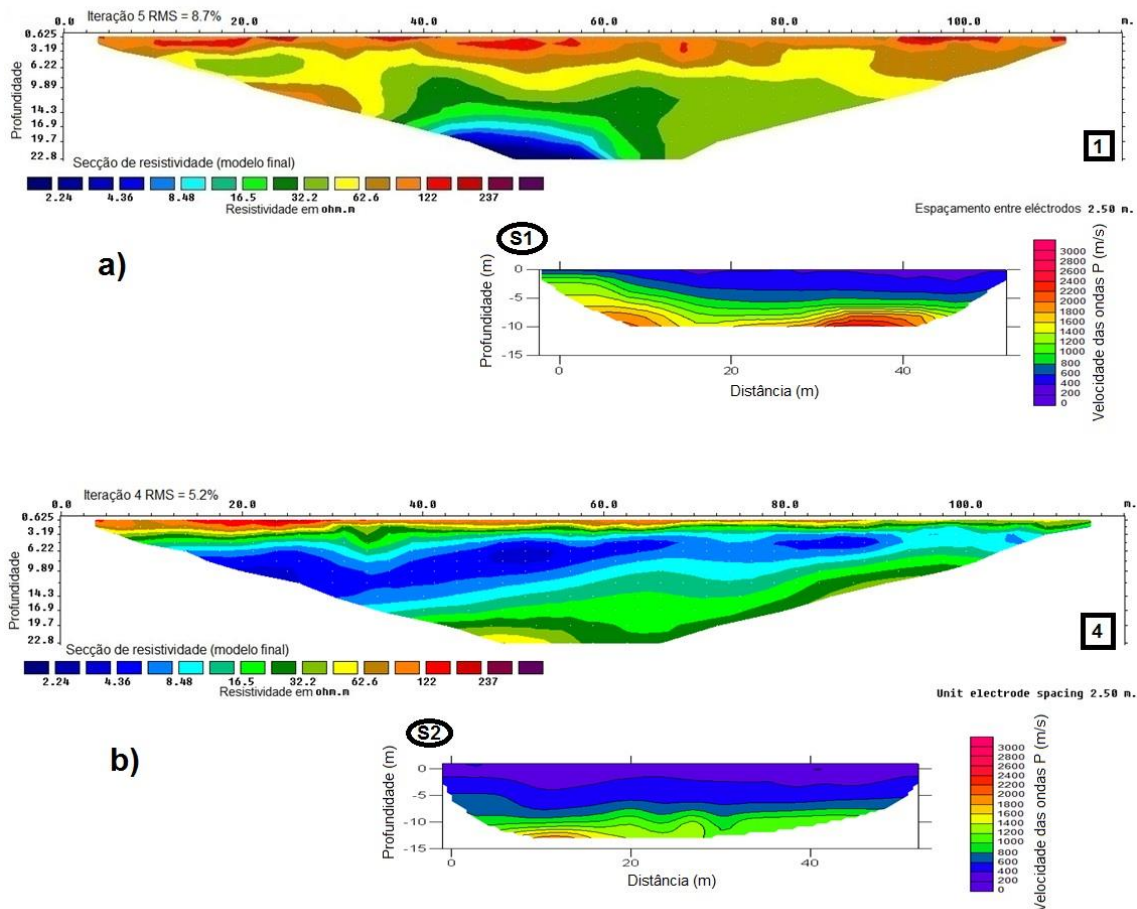


Figura IV.17 – Tomografias de refracção sísmica versus Secções de resistividade eléctrica: a) secção 1 de RE e tomografia sísmica S1; b) secção 4 de RE e tomografia sísmica S2.

Os perfis realizados através do método MASW, $S1_M$ e $S2_M$, foram efectuados no mesmo local de S1 e S2. A interpretação dos dados obtidos por este método teve como base a metodologia descrita por Park et al, 1999. Esta técnica analisa a medida da dispersão das ondas R através do respectivo registo obtido por fontes mecânicas, que está relacionada com um modelo de espessuras e de velocidades de ondas S das camadas. Após a aquisição dos dados de ondas R, em registos multicanal, segue-se a

construção e análise da curva de dispersão e por fim a inversão do modelo de V_s em função da profundidade, partindo da curva de dispersão construída (Park et al., 1997 e Park et al., 1999).

A aquisição dos dados de ondas R foi efectuada com a mesma geometria utilizada na SR, porém a janela de tempo de aquisição dos dados foi de 0,5s de forma a gravar em todos os canais o designado cone de “*ground roll*” com ondas R. A partir deste registo é possível obter o seu respectivo espectro de frequência-velocidade de fase, sobre o qual são escolhidas as curvas de dispersão. Posteriormente a curva de dispersão é invertida de modo a extrair o modelo de espessuras e respectivas V_s .

Através do *software* winMASW obtém-se então um perfil vertical de velocidades de ondas S, para cada tiro, como já referido, através do ajuste automático e iterativo de curvas de dispersão (velocidade de fase em função da frequência) sobre modelos sintéticos de camadas da terra em relação à curva de dispersão obtida dos dados de campo (Fig. IV.18 e Fig. IV.19). Uma vez que os resultados obtidos nos tiros directo e inverso são semelhantes, optou-se apenas pela inclusão dos gráficos relativos ao tiro directo que são representativos dos locais estudados.

A curva de dispersão com cor rosa (escolhido) nos gráficos velocidade de fase-frequência representa os pontos que seleccionamos e a curva azul (melhor modelo) representa a melhor curva definida pelo algoritmo para aqueles dados. Como, em ambos os casos (Fig. IV.18 e Fig. IV.19), estas duas curvas são semelhantes podemos admitir que existe uma boa adequação entre os dados de campo e respectivo modelo.

Relativamente aos gráficos referentes à velocidade das ondas S, está representado a azul o melhor modelo do terreno para aqueles dados, a vermelho um modelo médio, e a cinza todos os modelos considerados para obter o resultado final (Fig. IV.18 e Fig. IV.19).

Pela análise dos modelos de distribuição das V_s nos dois locais, verifica-se que na zona norte do VC ($S1_M$), de uma forma geral, as ondas S se propagam a maior velocidade, variando entre os 180m/s e os 1380m/s (Fig. IV.18). No caso da zona sul ($S2_M$) as ondas S propagam-se num intervalo compreendido entre os 150m/s e os

870m/s (Fig. IV.19). Isto confirma as indicações já obtidas da SR sobre as características do terreno atravessado pelas ondas sísmicas.

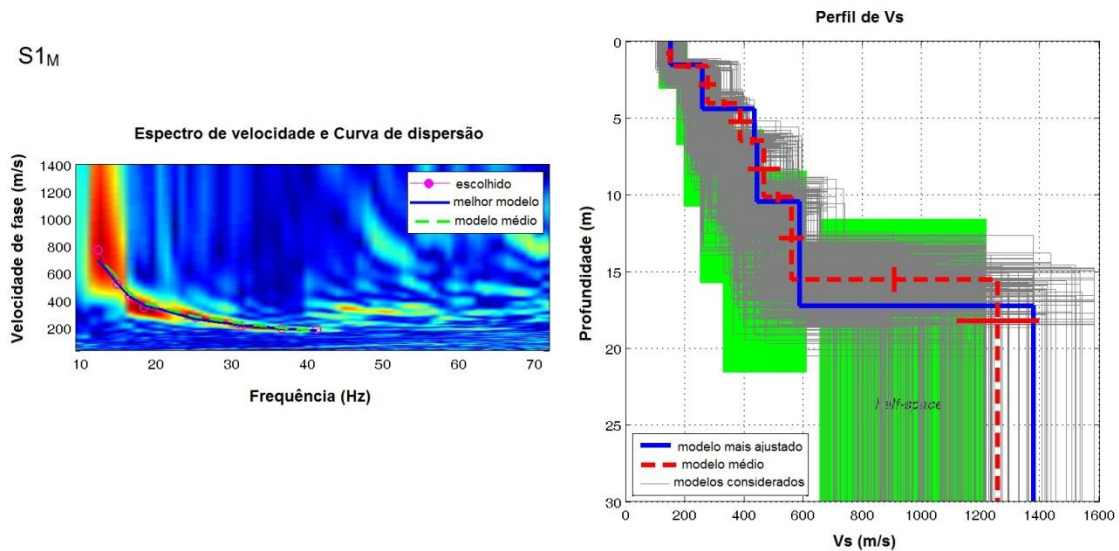


Figura IV.18 – Espectro de velocidade de fase em função da frequência e curva de dispersão para S1_M (esquerda). Modelo de distribuição de velocidade de propagação de ondas S em profundidade gerado para S1_M (direita).

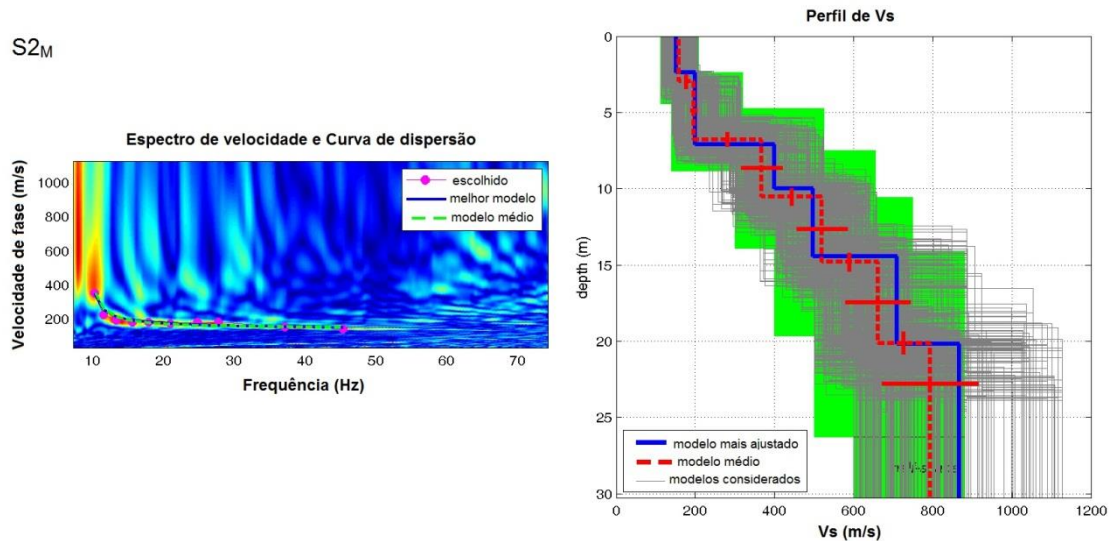


Figura IV.19 – Espectro de velocidade de fase em função da frequência e curva de dispersão para S2_M (esquerda). Modelo de distribuição de velocidade de propagação de ondas S em profundidade gerado para S2_M (direita).

Por volta dos 7m de profundidade verifica-se um aumento da V_s em S2_M (Fig. IV.19), que está de acordo com o aumento da V_p observado também no mesmo local, em S2, sendo indicativo da passagem para um terreno com comportamento mecânico mais rígido. Aos 10m, 14m e 20m a V_s vai aumentando progressivamente até atingir os

870m/s. No caso de $S1_M$, verifica-se um ligeiro aumento da V_S por volta dos 4m de profundidade (Fig. IV.18), evidenciado também no registo da SR para V_P . A V_S volta a aumentar cerca dos 11m de profundidade e novamente aos 17m, mostrando que o comportamento mecânico do terreno se vai tornando cada vez mais rígido com a profundidade.

Tyler Smith et al. (2012a) utilizaram a metodologia MASW numa área granítica interpretando o topo do maciço rochoso com $V_S=427\text{m/s}$. Considerando esta V_S na área do presente estudo como topo do maciço granítico, poderemos identificá-lo cerca dos 5m de profundidade na zona norte do VC e cerca dos 10m de profundidade na zona sul do VC. Esta interpretação está igualmente de acordo com o que foi identificado através das V_P obtidas pela SR.

No que diz respeito à distinção entre células contendo resíduos e solos não perturbados, o estudo de Tyler Smith et al. (2012b) define esta interface com V_S compreendidas entre os 152m/s e os 183m/s. Se forem considerados estes valores para a área de estudo, verifica-se que na zona norte do VC correspondem aos 2m de profundidade e na zona sul aos 3m de profundidade. Estas profundidades estão de acordo com a profundidade à qual as novas células de resíduos foram colocadas (Russo, 2005).

IV.1.4. ANÁLISES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS

Na envolvente ao VC existiam 3 poços de monitorização ambiental, onde foram instalados 3 piezómetros (Piezómetro1, 2, 3) montados em tubos de PEAD com a câmara de drenagem ranhurada e envolta em geotêxtil. Nesses locais foram recolhidas amostras de água subterrânea no período compreendido entre 2005 e 2007 e também no ano de 2010. Actualmente existem 5 piezómetros (Pz1, 2, 3, 4, 5) também montados em tubos de PEAD com a câmara de drenagem ranhurada e envolta em geotêxtil, onde são recolhidas amostras de água subterrânea desde 2011. Para comparação dos resultados obtidos nesses piezómetros com locais fora da influência do VC de Matosinhos foram seleccionados 4 pontos de amostragem (Poço1, Poço2, Furo, Nascente) onde se recolheram amostras de água em 2011 (Fig. IV.20).

Foram ainda escolhidos outros 2 pontos de amostragem em 2011, estes no rio Leça (Montante, Jusante), para comparação com as águas subterrâneas (Fig. IV.20).

Nas análises físico-químicas realizadas entre 2005 e 2007 em amostras de água obtidas nos piezómetros foram medidos mensalmente o pH, a condutividade eléctrica e os cloretos, e semestralmente todos os parâmetros previstos no Decreto-Lei 236/98, de 1 de Agosto. Após um período de 2 anos sem monitorização, a partir de 2010 estas análises foram efectuadas uma vez por ano para todos os parâmetros e trimestralmente para o pH, a condutividade eléctrica e os cloretos.

Segundo os registos mais recentes, efectuados em 2011 e 2012, o nível da água a montante do VC (Pz1, 4, 5) varia entre 9 e 11m de profundidade. A jusante do VC o nível da água (Pz2, 3) varia entre os 3.3 e os 4.2m de profundidade. Assim sendo o nível da água da zona norte encontra-se a maior profundidade do que na zona sul do VC. Os resíduos depositados no VC de Matosinhos encontram-se acima do nível da água. O fluxo de água subterrânea faz-se no sentido NW-SE (Fig. IV.20), das zonas de cotas mais elevadas (51-53m) para as zonas de cotas mais baixas (23-24m).



Figura IV.20 – Sentido do fluxo subterrâneo (setas azuis) e localização dos pontos de amostragem de águas na área de estudo.

Como forma de distinguir as diferentes origens das águas existentes na área de estudo, estas foram divididas em quatro grupos:

- Grupo 1 – águas directamente recolhidas do rio Leça (jusante e montante);
- Grupo 2 – águas subterrâneas recolhidas fora dos limites do VC de Matosinhos (Poço1, Poço2, Furo, Nascente);
- Grupo 3 – águas subterrâneas recolhidas nos piezómetros a jusante do VC (Piezómetro3, Pz1, Pz2, Pz3);
- Grupo 4 – águas subterrâneas recolhidas nos piezómetros a montante do VC (Piezómetro1, Piezómetro2, Pz4, Pz5).

Na tabela IV.1 encontram-se sumarizados os valores de pH, concentração de cloretos e condutividade eléctrica obtidos nos 4 grupos de águas acima descritos. De salientar que os valores de condutividade eléctrica e concentração de cloretos são mais elevados nas águas do Grupo 3, piezómetros a jusante do VC, especialmente nos locais de amostragem junto ao rio Leça, na zona do VC que não se encontra impermeabilizada na base. Nas águas do Grupo 3, os valores mais baixos dos diferentes parâmetros foram registados no Pz1, cuja localização é mais afastada da zona não impermeabilizada do VC.

Tabela IV.1 – Valores de pH, concentração de cloretos e condutividade eléctrica obtidos nos 4 grupos de águas.

GRUPO	pH	CLORETOS	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
1	7.3	56mg/L	406µS/cm (40.6mS/m) - montante 417µS/cm (41.7mS/m) - jusante
2	5.8 - 6	24 - 56mg/L	225 - 458µS/cm (22.5 - 45.8mS/m)
3	5.4 - 7.4	64 - 1550mg/L	437 - 6500µS/cm (43.7 - 650mS/m)
4	5.3 - 6.7	42 - 299mg/L	223 - 1420µS/cm (22.3 - 142mS/m)

No caso das águas do Grupo 1 e Poço1 e Poço2 (Grupo 2) os valores de condutividade excedem ligeiramente os VMR para águas de consumo humano (400µS/cm). No caso do Grupo 3 todos os valores de condutividade estão bastante acima do VMR para águas de consumo humano o mesmo acontecendo em alguns casos no Grupo 4. Apenas os pontos de amostragem Furo e Nascente, estão de acordo com o recomendado por lei para este parâmetro.

Quanto à concentração de cloretos nas águas subterrâneas, esta excede em todos os casos o VMR para águas de consumo humano (20mg/L), no entanto as águas do Grupo 1 e Grupo 2 encontram-se abaixo do VMR para águas de rega (70mg/L), podendo assim ser usadas apenas para esse fim.

No que diz respeito ao pH, apenas as águas do Grupo 4, que têm $5.3 < \text{pH} < 6.7$, se encontram um pouco abaixo dos VMR para águas de consumo humano ($6.5 < \text{pH} < 8.5$).

Os valores obtidos nas águas do Grupo 2, que se encontram fora dos limites do VC e mais afastadas do VC do que as restantes, são aqui considerados como referência para os valores de *background* para as águas subterrâneas da área de estudo. Todos os outros grupos mostram de uma forma mais ou menos significativa influência do VC.

Comparando os resultados obtidos em 2000 (Russo, 2005) nos piezómetros Pz4 (montante) e Piezómetro3 (jusante), com os resultados mais recentes apresentados neste estudo, verifica-se que os valores de pH vão decrescendo de 7 para 6.4 em Pz4 e de 7.8 para 6.8 em Piezómetro3. No que diz respeito à condutividade esta passa de 260 para 142mS/m em Pz4, e de 270 para 210mS/m em Piezómetro3, embora neste caso vá sofrendo flutuações significativas entre esses dois períodos (Fig. IV.21).

De qualquer forma, verifica-se que ao longo do tempo os valores de condutividade foram sempre mais elevados no piezómetro a jusante do VC, o que está de acordo com os valores obtidos nos restantes pontos de amostragem do Grupo 3 e relacionado com a zona do VC não impermeabilizada na base.

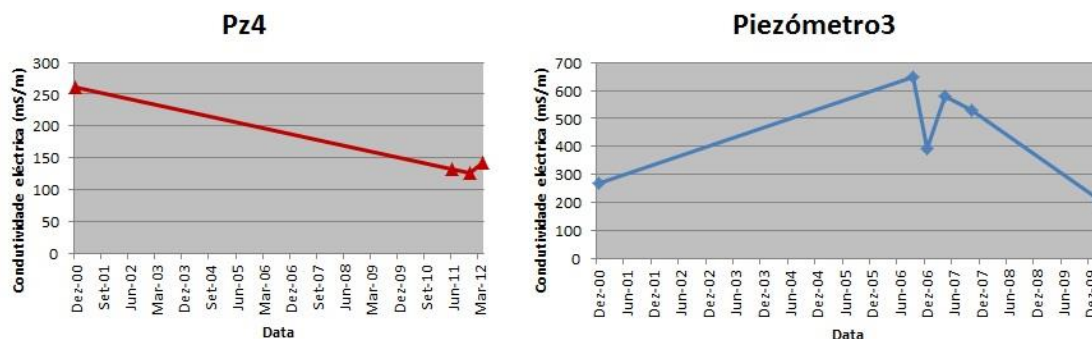


Figura IV.21 – Comparação de resultados de condutividade eléctrica na água subterrânea referente a um piezómetro a montante (Pz4) e outro a jusante do VC (Piezómetro3).

Para comparar os valores de condutividade eléctrica obtidos nas análises de água subterrânea com os valores obtidos pelo método da resistividade eléctrica, utilizaram-se dados obtidos em épocas coincidentes. Assim sendo, e tendo em atenção que estamos a medir diferentes meios (solo+água vs água), verifica-se que os valores obtidos de forma directa (análises de água) estão em concordância com os valores obtidos de forma indirecta (método da resistividade eléctrica).

Por exemplo no caso dos dados de condutividade eléctrica/resistividade eléctrica obtidos em fevereiro de 2010 verifica-se essa concordância:

- Valor analítico obtido no Piezómetro1 (Grupo 4) de 28.6mS/m (35Ω.m) vs valores obtidos através da secção de resistividade do perfil1 entre 16mS/m (62.6Ω.m) e 21.1mS/m (47.4Ω.m) (Fig. IV.22a);
- Valor analítico obtido no Piezómetro3 (Grupo 3) de 210mS/m (4.76Ω.m) vs valores obtidos através da secção de resistividade do perfil3 entre 117.7mS/m (8.5Ω.m) e 227.3mS/m (4.4Ω.m) (Fig. IV.22b).

Tendo em conta a Lei de Archie (Eq. III.11 e 12, capítulo III.1.3.1), foi também estimada a porosidade do meio, com base na média da resistividade do meio e na resistividade obtida na água. Os valores dos parâmetros empíricos a e m , foram obtidos através da tabela de Keller e Frischknecht (1996) que indica os valores característicos desses parâmetros para os diferentes materiais. Assim sendo foram encontrados valores de porosidade entre 39 e 43%, que estão de acordo com os valores encontrados em solos residuais do granito do Porto (Viana da Fonseca, 1996).

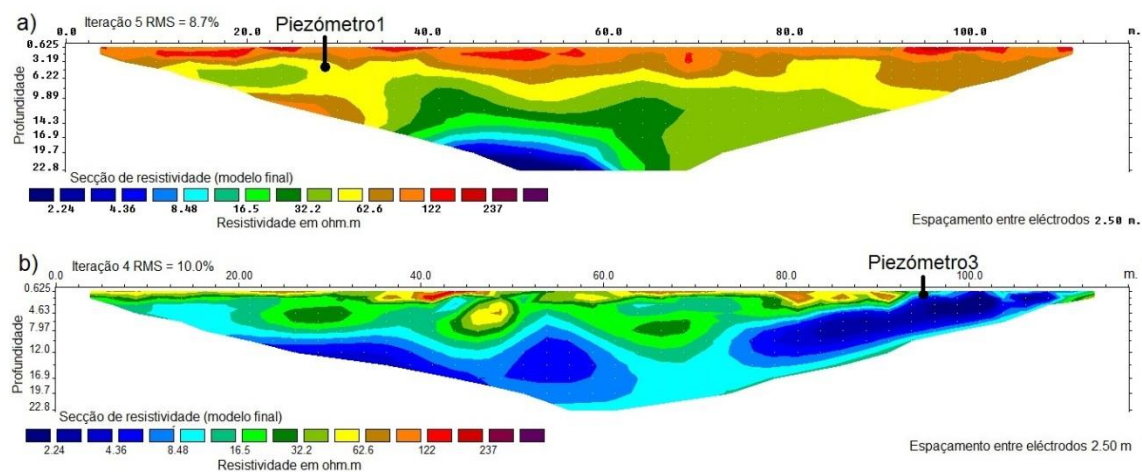


Figura IV.22 – Resultados de condutividade eléctrica obtidos na água subterrânea vs resultados de resistividade eléctrica (2010): a) Piezómetro1 e secção de resistividade do perfil1; b) Piezómetro3 e secção de resistividade do perfil3.

Nas análises efectuadas em 2011 e 2012, para Pz4 e Pz5 (Grupo 4) os valores de condutividade variaram entre 76.2mS/m (13.1Ω.m) e 142mS/m (7Ω.m), e para Pz1, Pz2, Pz3 (Grupo 3) variaram entre 43.7mS/m (22.9Ω.m) e 300mS/m (3.3Ω.m).

Comparando estes valores com os valores obtidos pelo método da resistividade eléctrica, verifica-se que estão bastante de acordo:

- Valores analíticos obtidos em Pz4 entre 76.2mS/m (13.1Ω.m) e 97.8mS/m (10.2Ω.m) vs valores obtidos pelo método da RE na secção do perfil7 de 8.5 a 16.5Ω.m (Fig. IV.23a);
- Valores analíticos obtidos em Pz5 entre 127mS/m (7.9Ω.m) e 142mS/m (7Ω.m) vs valores obtidos pelo método da RE na secção do perfil13 de 8.5 a 16.5Ω.m;
- Valores analíticos obtidos em Pz1 entre 43.7mS/m (22.9Ω.m) e 83.5mS/m (12Ω.m) vs valores obtidos pelo método da RE na secção do perfil6 de 12.5 a 24.4Ω.m;
- Valores analíticos obtidos em Pz2 entre 172mS/m (5.8Ω.m) e 300mS/m (3.3Ω.m) vs valores obtidos pelo método da RE na secção do perfil4 de 4.4 a 8.5Ω.m;
- Valores analíticos obtidos em Pz3 entre 186mS/m (5.4Ω.m) e 210mS/m (4.8Ω.m) vs valores obtidos pelo método da RE na secção do perfil2 de 4.4 a 6.4Ω.m (Fig. IV.23b).

De salientar que todos os valores obtidos nestes novos piezómetros, cujas análises são as mais recentes, estão muito acima do VMR para águas de consumo humano (40mS/m). Com excepção dos valores obtidos em Pz1, que se localiza a maior distância da zona do VC não impermeabilizada na base, todos os restantes valores de condutividade são mais altos a jusante do VC do que a montante.

Os resultados obtidos nas análises físico-químicas à água colhida nos piezómetros de monitorização do VC de Matosinhos, efectuados entre 2005 e 2007, revelaram valores de condutividade (Fig. IV.24): para Piezómetro1 (Grupo 4) entre 19.9mS/m (50.3Ω.m) e 65.5mS/m (15.3Ω.m), para Piezómetro2 (Grupo 4) entre 22.3mS/m (44.8Ω.m) e 53.1mS/m (18.8Ω.m) e para o Piezómetro3 (Grupo 3) entre 210mS/m (4.76Ω.m) e 810mS/m (1.2Ω.m).

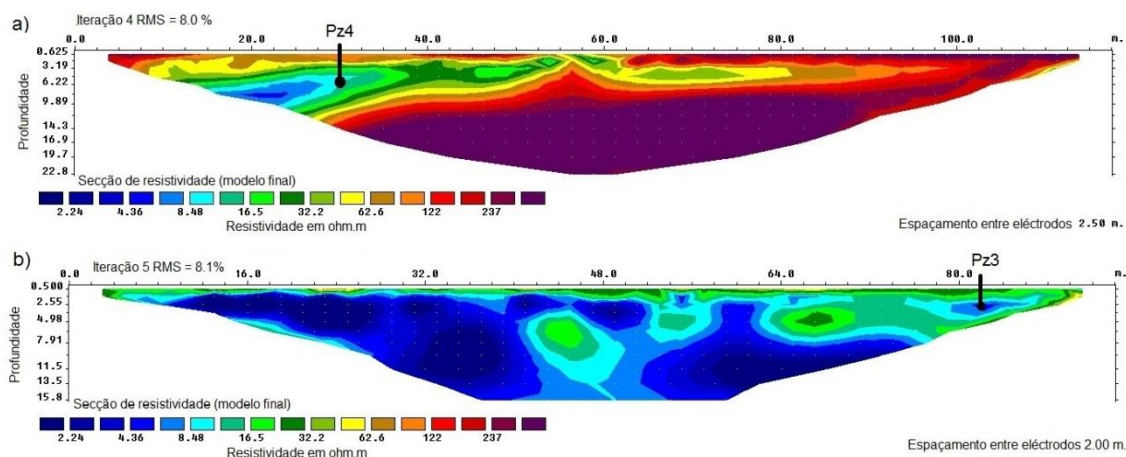


Figura IV.23 – Resultados de condutividade eléctrica obtidos na água subterrânea vs resultados de resistividade eléctrica (2011-2012): a) Pz4 e secção de resistividade do perfil7; b) Pz3 e secção de resistividade do perfil2.

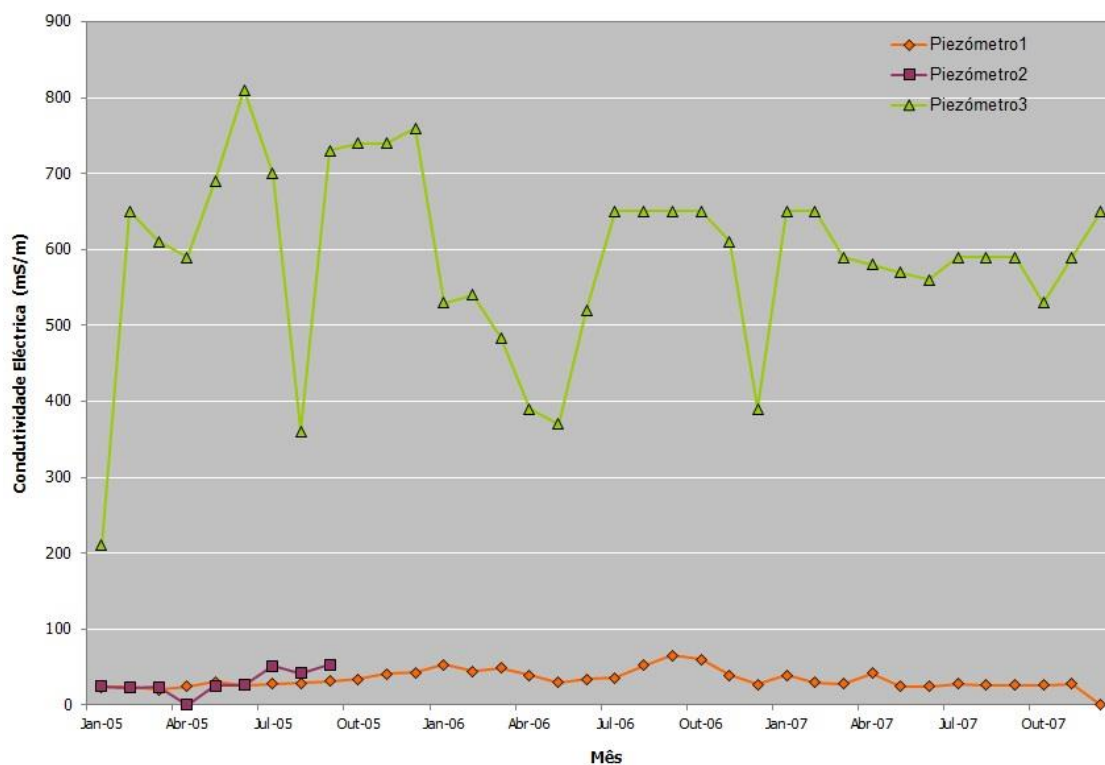


Figura IV.24 – Resultados de condutividade eléctrica obtidos na água subterrânea dos Piezómetros 1, 2 e 3.

Ou seja, também durante este período, os valores de condutividade eléctrica foram sempre mais elevados a jusante do VC, junto da zona do VC não impermeabilizada na base. Como este período é anterior ao início dos trabalhos de prospecção geofísica realizados no âmbito do presente estudo, não existem dados geofísicos para comparação. No entanto, se estes forem comparados com os dados geofísicos obtidos em 2010, verifica-se que os valores mais baixos de condutividade obtidos

analiticamente em cada piezómetro se enquadram nos valores obtidos pelo método da RE: montante - 16mS/m ($62.6\Omega.m$) e 21.1mS/m ($47.4\Omega.m$); jusante - 117.7mS/m ($8.5\Omega.m$) e 227.3mS/m ($4.4\Omega.m$). Quanto aos restantes valores analíticos obtidos entre 2005 e 2007 estes encontram-se ligeiramente acima dos dados geofísicos de 2010 na zona a montante do VC, e muito acima dos dados geofísicos de 2010 na área a jusante do VC. Esta observação dá a indicação que, de 2007 para 2010, houve um decréscimo de condutividade no meio, mais significativo a jusante do VC.

Comparando as águas dos locais de amostragem de todo o Grupo 3 verifica-se que de uma forma geral os valores de condutividade obtidos nas águas dos novos piezómetros (Pz1, Pz2, Pz3) são mais baixos do que os obtidos no piezómetro antigo (Piezómetro3). No que diz respeito às águas do Grupo 4 os valores de condutividade são mais baixos nos piezómetros antigos (Piezómetro1, Piezómetro2) do que nos novos piezómetros (Pz4, Pz5). Esta informação é meramente indicativa de que pode ter ocorrido um ligeiro aumento da contaminação na parte norte do VC e uma diminuição da contaminação na parte sul do VC, de 2007 para 2011/2012. No entanto, como as coordenadas dos antigos e dos novos piezómetros são diferentes, esta informação poderá estar apenas relacionada com o local de recolha da água subterrânea que pode localizar-se num meio mais ou menos condutivo. De qualquer forma, independentemente de se tratar de novos ou antigos piezómetros, os valores de condutividade das águas do Grupo 3 são mais elevados do que os das águas do Grupo 4.

Os valores de condutividade eléctrica obtidos através de análises físico-químicas às águas subterrâneas na área em estudo, parecem indicar uma forte influência de contaminação proveniente do VC na água da sua envolvente imediata, com particular incidência na área a SE do VC (zona não impermeabilizada). Esta mesma influência foi também constatada através dos perfis de resistividade eléctrica realizados na envolvente ao VC.

Para determinar quais os elementos responsáveis pela contaminação na área de estudo e, conseqüentemente, qual a tipologia dos resíduos de onde são provenientes, é necessário analisar a evolução dos elementos maiores e menores ao longo do tempo e verificar a correlação existente entre os valores de condutividade eléctrica e a concentração dos diferentes elementos nas águas subterrâneas.

Numa primeira fase foram elaborados os diagramas de Piper e Stiff utilizando o programa RockWorks, para os locais e datas de amostragem em que se analisaram todos os parâmetros necessários à sua construção (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} e SO_4^{2-}). Optou-se pela inclusão de diagramas de Stiff, uma vez que ilustram melhor o que se detectou nas águas subterrâneas do que os de Piper.

As águas do Grupo 2 (Fig. IV.25), aqui utilizadas como referência para os valores de *background* da área de estudo apresentam valores de Na^+ e Cl^- um pouco acima dos VMR, estando os restantes elementos abaixo dos VMR para águas de consumo humano.

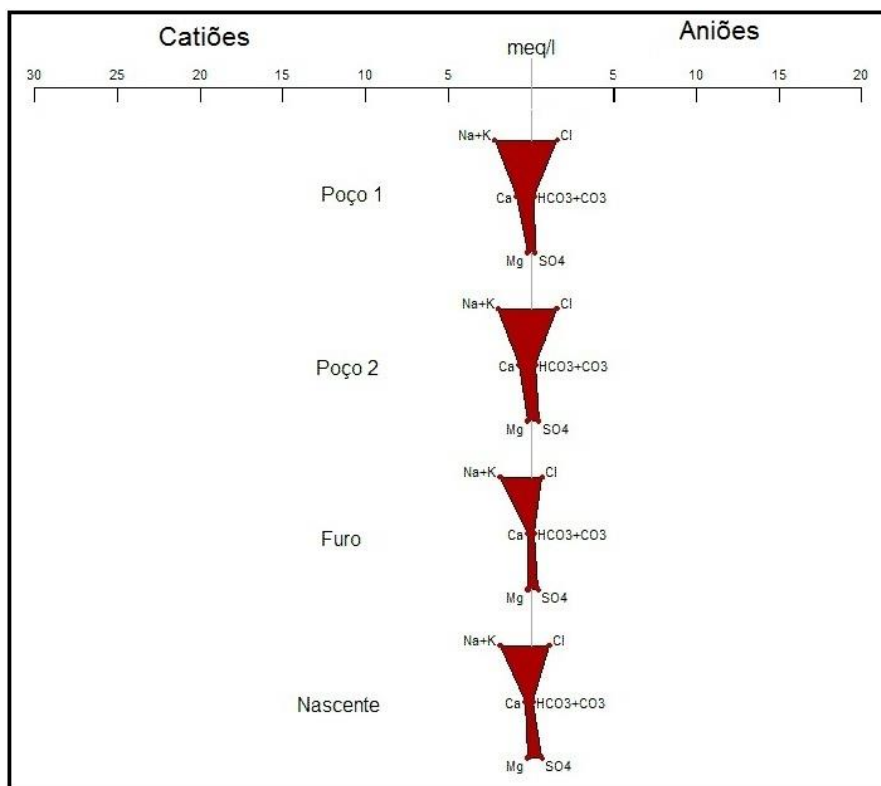


Figura IV.25 – Diagramas de Stiff para as águas subterrâneas do Grupo 2.

As águas do Grupo 4 (Fig. IV.26), referentes aos piezómetros a montante do VC, têm composições um pouco diferentes consoante se trate dos piezómetros antigos (Piezómetro1 e Piezómetro2) ou dos novos (Pz4 e Pz5). No caso dos antigos a sua composição é semelhante aos valores de *background*, excedendo por vezes os VMR para águas de consumo humano. Para nos novos piezómetros todos os elementos têm concentrações mais elevadas que as do Grupo 2, especialmente o Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} , excedendo os VMR e VMA para águas de consumo humano.

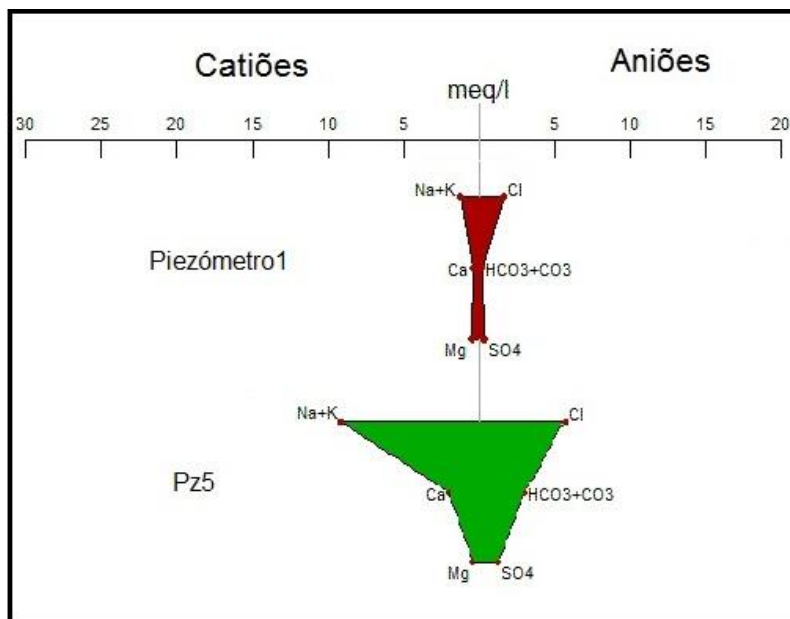


Figura IV.26 – Diagramas de Stiff para águas subterrâneas do Grupo 4.

As águas do Grupo 3 (Fig. IV.27), pertencentes aos piezómetros de jusante, apresentam valores de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} que excedem largamente os valores de *background*, os VMR e VMA para águas de consumo humano e de rega, com excepção do Pz1, cujos valores são muito semelhantes aos valores de *background*.

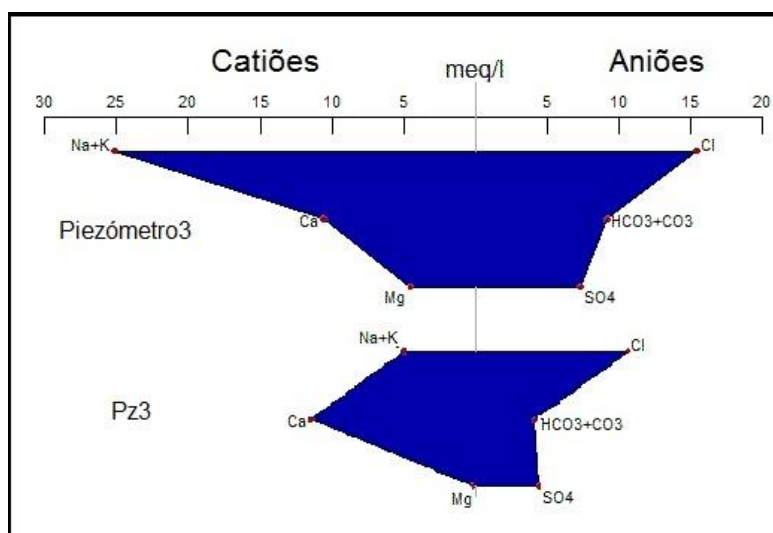


Figura IV.27 – Diagramas de Stiff para águas subterrâneas do Grupo 3.

Foi criada uma matriz de correlações para determinar quais os elementos que estão directamente relacionados com a condutividade. Obteve-se uma correlação muito positiva (factor de correlação superior a 0.75) entre condutividade e concentração de Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , Al^{3+} , NH_4^+ , Ba^{2+} , e NO_2^- . Também se obteve uma correlação muito

positiva entre a concentração de Cl^- e a concentração de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Al^{3+} , NH_4^+ , Ba^{2+} e NO_2^- . Assim sendo, estes serão os elementos com maior influência nos valores de condutividade observados na área de estudo.

A presença de certos elementos menores, muitas vezes acima dos VMR ou VMA para águas de consumo humano ou de rega, pode ser também um complemento para a identificação da proveniência dos contaminantes presentes na área de estudo.

Verifica-se que:

- Cd^{2+} e Hg^{2+} apresentaram sempre valores um pouco acima dos VMR e VMA, especialmente a jusante do VC;
- Pb^{2+} , Cr^{3+} e Ni^{2+} apresentaram valores acima dos VMR e VMA a jusante do VC;
- Fe^{2+} , Na^+ e NO_3^- apresentaram quase sempre valores acima dos VMR e VMA, especialmente a jusante do VC, apesar de os próprios valores de background já estarem ligeiramente acima desses limites;
- A presença de fenóis foi identificada sempre acima dos VMR e VMA, especialmente a jusante do VC;
- Mn^{2+} e Zn^{2+} foram detectados quase sempre acima dos VMR e VMA;
- SO_4^{2-} apresentou por vezes valores acima dos VMR e VMA, especialmente a jusante do VC.

Comparando estes resultados com os obtidos em 1995/2000 (tabela III.3 – capítulo 3) verifica-se que os valores de NH_4^+ e Pb^{2+} diminuíram, os de Cu^{2+} e As^{3+} deixaram de ultrapassar os valores limite, os de Cd^{2+} , Hg^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} e Zn^{2+} aumentaram ligeiramente.

De acordo com a tabela III.1 (capítulo 3), a presença de Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ e SO_4^{2-} está relacionada com a presença de resíduos de origem orgânica, a presença de Fe^{2+} pode estar associada a material electrónico, latas, tampas de garrafa, a presença de Hg^{2+} , Mn^{2+} e Ba^{2+} a resíduos de pilhas ou lâmpadas fluorescentes, a existência de Ni^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} e Pb^{2+} associa-se a baterias de automóveis e telemóveis, a presença de Al^{3+} a latas descartáveis, utensílios domésticos, cosméticos, embalagens de alumínio em geral, a presença de Cl^- pode estar associada a tubos de PVC, negativos de filmes e raios-X, a presença de Cr^{3+} pode estar associada a embalagens de tintas, vernizes ou solventes orgânicos.

Estes resíduos enquadram-se nos grupos relativos a plásticos, metais, e matéria fermentável que, segundo Russo (2005), foram depositados no VC de Matosinhos. De salientar a diversidade de resíduos que se encontram depositados no VC de Matosinhos e a perigosidade que muitos deles ainda representam para os solos e águas subterrâneas da área de estudo.

IV.1.5. ABORDAGEM ESTATÍSTICA AOS DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A abordagem estatística aos dados de resistividade eléctrica foi efectuada em duas fases: a primeira envolvendo apenas os dados de RE relativos aos perfis 1 a 13, que funcionou como população de teste, a segunda englobando todos os dados de RE obtidos.

Numa primeira fase, para testar a metodologia descrita no capítulo III.3, foram efectuados testes recorrendo à macro do Visual Basic designada BACKGROUND (Nakic et al., 2007). Para tal utilizaram-se os perfis de RE 1 a 13 (excluindo o 11 pois trata-se de uma repetição do 2). Os dados de RE foram divididos por intervalos, de forma a fazer uma análise seccionada e mais detalhada da anomalia. No sentido de visualizar a distribuição, nesta fase experimental, o número total de dados, obtidos pelo método da resistividade eléctrica, era de 3980, e, assim, foi escolhido o número de intervalos (13), com base na regra de Sturge (Everitt, 1998):

$n_c = \log_2 n + 1 = \log_2 3980 + 1 = 11.95 + 1 = 12.95$ (sendo n - número de dados da população e n_c - número de classes).

Recorrendo ao teste de normalidade Lilliefors, verifica-se que, no seu todo, a população é normal mas, sub-dividindo a população em 13 distribuições (intervalos de profundidade), verifica-se que, apenas para o método *Calculated distribution function*, em certas distribuições (8, 10, 12, 14, 16 - Tab. IV.2) o teste de normalidade de Lilliefors (T) é ligeiramente superior ao valor de T crítico definido por Lilliefors (1967). Isto deve-se provavelmente ao facto de o número de valores anómalos ser superior ao número de valores de *background* nestas distribuições e assim sendo o intervalo de *background* é sobrestimado (Nakic et al., 2007).

Para cada gama de profundidade de investigação foi então obtido o valor de resistividade que separava anomalia de *background* e os respectivos valores anómalos e de *background* para cada método (Tab. IV.2). Verifica-se que o método *Iterative 2σ* apresenta valores para o limiar anomalia/*background* mais elevados do que o método *Calculated distribution function* (excepto nas distribuições de maior profundidade, 20, 24 e 28). Isto deve-se provavelmente ao facto de no algoritmo do método *Calculated distribution function* serem utilizados dois passos diferentes do método *Iterative 2σ* que incluem o cálculo da mediana da população.

Tabela IV.2 – Resultados de valores de resistividade anómalos e de *background* obtidos pelos métodos *Iterative 2σ* e *Calculated distribution function*, para 13 distribuições com diferentes profundidades.

DESIGNAÇÃO	PROFUNDIDADE	MÉTODO ITERATIVE 2 SIGMA			MÉTODO CALCULATED DISTRIBUTION FUNCTION		
		ANOMALIA RESISTIVIDADE (Ωm)	BACKGROUND RESISTIVIDADE (Ωm)	Média+2DesvP	ANOMALIA RESISTIVIDADE (Ωm)	BACKGROUND RESISTIVIDADE (Ωm)	Média+2DesvP
DISTRIBUIÇÃO 1m	[0 a 1,5m[	4,38 - 71,96	73,00 - 2983,6	72,92	4,38 - 47,76	53,30 - 2983,6	53,14
DISTRIBUIÇÃO 2m	[1,5 a 2,5m]	0,15 - 71,41	72,03 - 2778,3	71,94	0,15 - 29,2	32,47 - 2778,3	36,75
DISTRIBUIÇÃO 3m	[2,5 a 4m[	0,19 - 48,35	49,01 - 1498,6	48,92	0,19 - 20,19	22,53 - 1498,6	23,09
DISTRIBUIÇÃO 5m	[4 a 5,5m[	0,7 - 47,2	48,45 - 723,22	48,44	0,7 - 17,97	20,48 - 723,22	20,27
DISTRIBUIÇÃO 6m	[5,5 a 7m]	0,73 - 55,08	56,27 - 2090,8	56,23	0,73 - 13,95	16,40 - 2090,8	16,68
DISTRIBUIÇÃO 8m	[7 a 9m]	0,43 - 43,75	44,35 - 3289,7	44,32	0,43 - 15,3	18,09 - 3289,7	17,26
DISTRIBUIÇÃO 10m	[9 a 11m]	0,47 - 37,9	39,02 - 2848,7	38,60	0,47 - 13,63	17,78 - 2848,7	16,79
DISTRIBUIÇÃO 12m	[11 a 13m]	1,07 - 29,53	30,08 - 1602,9	30,01	1,07 - 13,29	17,01 - 1602,9	13,41
DISTRIBUIÇÃO 14m	[13 a 15m]	1,32 - 234,19	244,82 - 1345	243,11	1,32 - 11,9	15,90 - 1345	13,00
DISTRIBUIÇÃO 16m	[15 a 18m]	1,47 - 226,98	242,43 - 1074,7	237,89	1,47 - 12,76	19,05 - 1074,7	14,21
DISTRIBUIÇÃO 20m	[18 a 21m]	3,13 - 16,31	21,67 - 1548,9	21,63	3,13 - 28,14	38,25 - 1548,9	29,66
DISTRIBUIÇÃO 24m	[21 a 25m]	0,35 - 13,81	19,35 - 1752,4	19,19	0,35 - 21,08	25,95 - 1752,4	21,74
DISTRIBUIÇÃO 28m	[25 a 29m]	—	39,76 - 211,61	28,98	39,76	76,69 - 211,61	63,81

De seguida criou-se um filtro booleano nos dados originais de resistividade, para separação dos valores anómalos para cada gama de profundidades (o valor um representando a anomalia e o valor zero representando o *background*). Esses dados em código binário, foram projectados a 2D e sobrepostos nos perfis de resistividade para comparação da eficácia das duas metodologias na determinação da anomalia (Fig. IV.28).

Pela comparação das figuras IV.28 e IV.29, referentes à secção de RE do perfil 12, observa-se uma concordância entre a definição da anomalia pelo método *Iterative 2σ* e pelo método empírico, descrito no capítulo IV.1.2, que considera o mesmo valor de anomalia para todas as profundidades estudadas. No caso do método *Calculated distribution function*, mantendo o exemplo da secção de RE do perfil 12 (Fig. IV.30), verifica-se que a anomalia é mais reduzida, tendo no entanto muito em comum com as anomalias delimitadas nas figuras IV.28 e IV.29.

Relativamente aos restantes perfis verificou-se que a tendência se mantém. Os motivos pelos quais há diferenças entre a anomalia calculada pelos dois métodos estão relacionados, por um lado, pela própria diferença de cálculo utilizada em cada método e, por outro lado, pelo facto do teste normalidade de Lilliefors (T) ser ligeiramente superior ao valor de $T_{\text{crítico}}$ definido por Lilliefors (1967) nas distribuições 8, 10, 12, 14, 16, e assim sendo o intervalo de *background* é sobrestimado para as respectivas profundidades e, como tal existem valores que não estão a ser considerados como anomalia, mas sim como *background*.

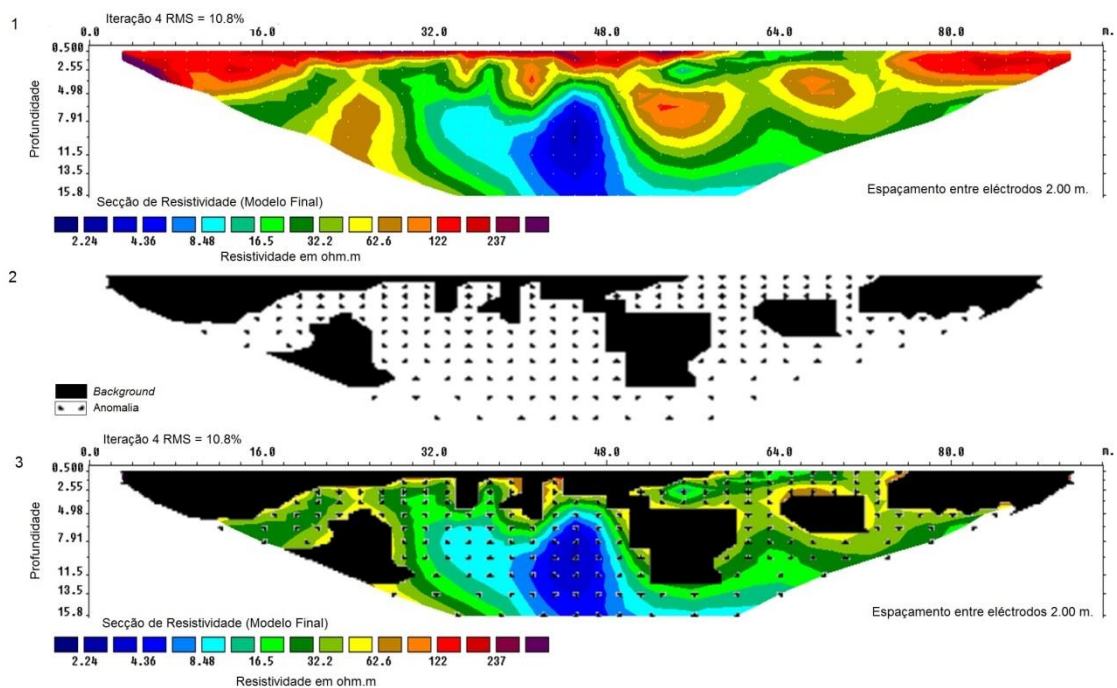


Figura IV.28 – Ilustração dos passos descritos no texto, para o perfil 12 com o método *Iterative 2σ*: 1 – modelo de resistividade (RES2DINV); 2 – filtro booleano; 3 – modelo de resistividade e filtro booleano sobrepostos.

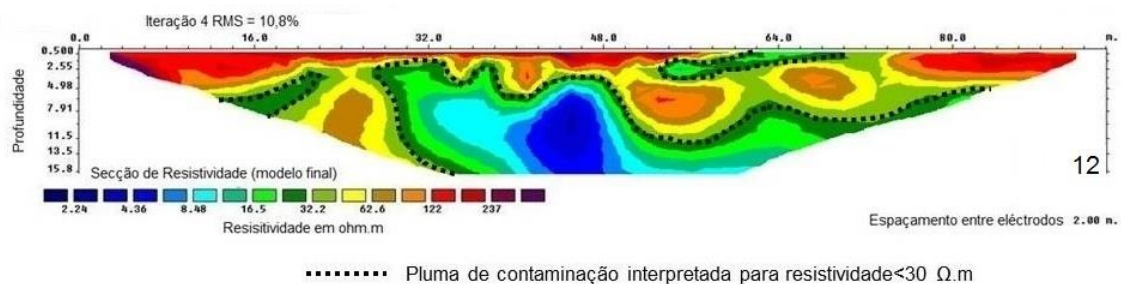


Figura IV.29 – Ilustração da anomalia interpretada na secção de RE do perfil 12, para resistividade < 30 Ω.m.

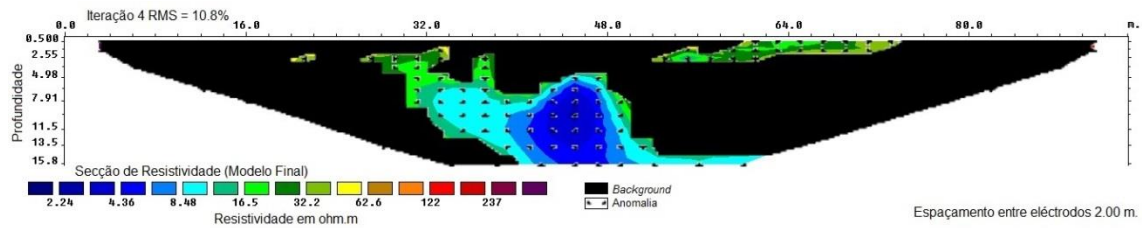


Figura IV.30 – Ilustração da anomalia interpretada com o método *Calculated distribution function*, para a secção de RE do perfil 12.

Esta situação é importante na medida em que permite que haja um maior ou menor conservadorismo em termos daquilo que é a definição de anomalia. Perante cenários de estudo de incerteza, levantados por insuficiência de dados directos e que corroborem os dados de resistividade, esta opção poderá ser relevante, por exemplo, para entidades que estejam interessadas na avaliação da contaminação segundo uma perspectiva optimista ou pessimista.

O método *Iterative 2σ* parece representar melhor a realidade do terreno em termos da distribuição da anomalia para este número de dados. Em todo o caso, no programa *GeoMerge*, que será abordado no capítulo seguinte, foram incluídos os algoritmos dos dois métodos para verificar se a tendência se mantém com a inclusão de mais dados referentes à totalidade dos perfis de resistividade eléctrica efectuados no terreno.

Uma vez que o método descrito por Lepeltier (1969) só é válido para um grande conjunto de dados, essa metodologia foi aplicada apenas com o número total de dados de RE obtidos (8287), para a determinação do limite anomalia/*background* da população. Sabendo que uma variável apresenta distribuição log-normal quando o seu logaritmo tem distribuição normal, recorreu-se à normalização da população de dados de resistividade. Para tal foram elaborados os cálculos descritos por Lepeltier (1969) para a criação do histograma da população, usando igualmente os critérios descritos por Lepeltier (1969) para número e amplitude de classes. Os dados foram então projectados utilizando uma escala logarítmica no eixo das abcissas (Fig. IV.31a).

Como resultado final foram projectadas as frequências acumuladas vs valores de resistividade eléctrica, sendo a inflexão na parte superior da curva, a representação gráfica do limite entre anomalia e *background* (Fig. IV.31b). Segundo esta metodologia (Lepeltier, 1969) o valor limite anomalia/*background* da população total corresponde a 794Ω.m.

Tendo em conta que esta forma de avaliação gráfica é um pouco subjectiva, posteriormente foram então efectuados os cálculos estatísticos para a população total (8287 dados) na macro do Visual Basic designada BACKGROUND, que inclui métodos mais objectivos (*Iterative 2 σ* e *Calculated distribution function*). Verificou-se que em ambos os métodos e para todas as distribuições o teste de normalidade de Lilliefors (T) é inferior ao valor de Tcrítico definido por Lilliefors (1967) o que indica a normalidade dos dados da população total e como tal valida a aplicação dos métodos *Iterative 2 σ* e *Calculated distribution function* aos dados de resistividade em estudo.

Foi efectuada também a verificação da log-normalidade do volume total dos dados numa aplicação própria em folha de cálculo. Conforme se pode observar na figura Fig. IV.31c, a população distribui-se de forma log-normal o que reforça o facto dos métodos estatísticos utilizados serem adequados ao tipo de dados em estudo.

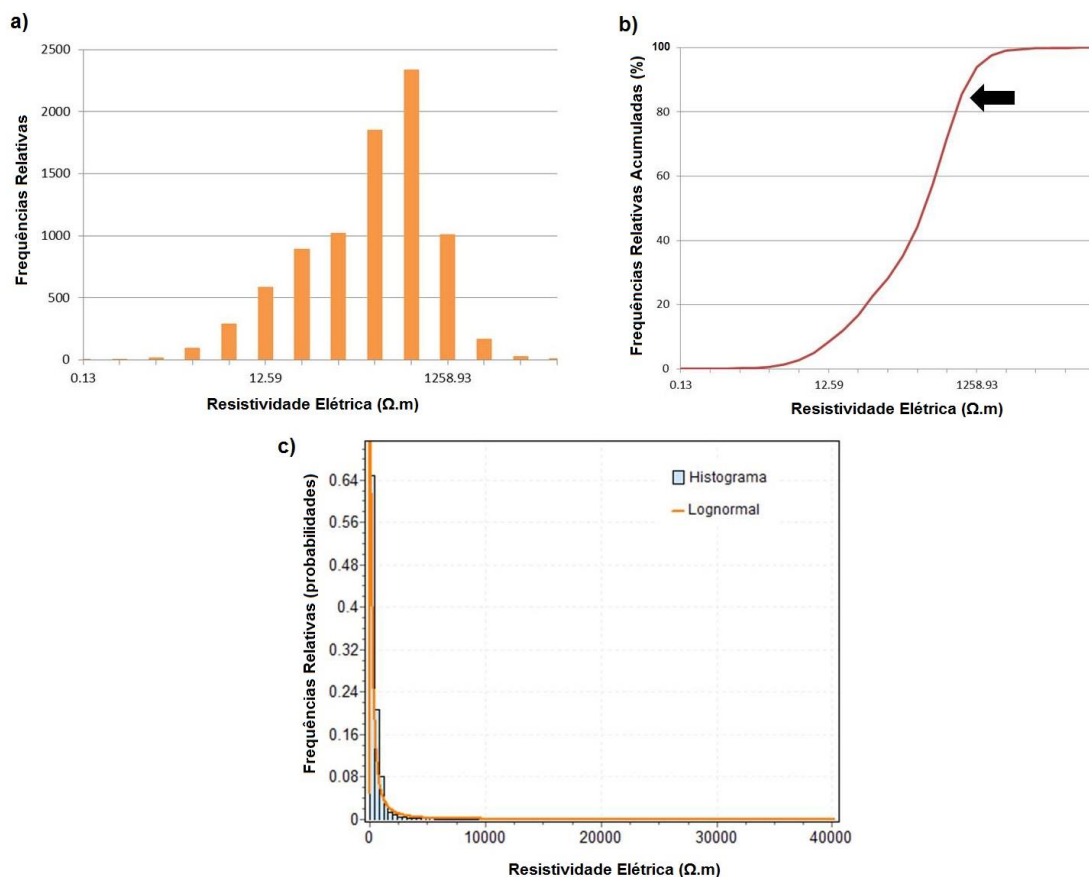


Figura IV.31 – Gráficos de distribuição da resistividade eléctrica: a) histograma da população; b) curva de frequências relativas acumuladas (seta indica o limite anomalia/background); c) histograma e curva de frequências relativas log-normal.

IV.2. INTEGRAÇÃO CONJUNTA DOS RESULTADOS

IV.2.1. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Com o conjunto diversificado de resultados obtidos torna-se importante fazer a sua integração conjunta a fim de sumarizar as interpretações que se podem obter com a complementaridade das informações recolhidas pela aplicação de diferentes metodologias de colheita de dados. Para tal, numa primeira fase, foi criado um modelo hidrogeológico conceptual para a área de estudo.

O modelo de um sistema natural é, por definição, uma representação formal e simplificada de uma dada realidade. Existem numerosas classificações de modelos (Beven, 2001). No caso dos modelos aplicados em Hidrogeologia, Fetter (2001) menciona os modelos conceptuais, que descrevem um sistema num dado instante, sendo portanto de carácter estático. O processo de conceptualização implica a compreensão da natureza do sistema hidrológico, das suas características genéricas (tais como a litologia, o tipo de solo, o relevo, a variabilidade espacial dos parâmetros hidráulicos, a hidrogeoquímica, as características geológicas e geométricas dos limites do sistema, etc.) e dos processos físicos e químicos envolvidos (Marques et al., 2008).

Para a elaboração do modelo conceptual da área de estudo (Fig. IV.32) foi utilizada como base a informação disponível sobre a topografia do local, anterior à instalação do VC e posterior ao seu encerramento. Foram incluídos dados relativos às áreas devidamente impermeabilizadas (aterro sanitário) e áreas não impermeabilizadas na base (antiga lixeira) que constituem o VC. A informação sobre o fluxo subterrâneo foi também inserida, assim como a delimitação da provável pluma de contaminação. A restante informação teve como base os dados de sondagens e os dados referentes aos perfis sísmicos realizados.

As informações recolhidas no campo e o estudo petrográfico contribuíram para clarificar algumas das informações recolhidas através de dados indirectos e, assim, ajudar na elaboração do modelo hidrogeológico conceptual. Na área de estudo,

observa-se um granito de duas micas, leucocrata, com uma textura de grão médio a fino (Granito do Porto). Os sistemas de fracturação, identificados para a área em estudo, apresentam orientações de NW-SE a NNW-SSE e NNE-SSW a ENE-WSW, estando de acordo com os principais sistemas de fracturação regional. Em grande parte da envolvente do VC, o granito encontra-se muito alterado e fracturado. Enquanto que, na zona mais superficial existe um meio de circulação misto (poroso e fracturado), em profundidade está presente um meio fracturado. Os sinais de deformação e alteração do granito, observados no campo, foram reforçados pelo estudo microscópico. O estudo microscópico revelou fenómenos indicadores de forte deformação e micro-fracturação do granito, da circulação de fluidos nessas mesmas fracturas que causaram a alteração de minerais já existentes e a formação de novos minerais. As associações mineralógicas tardias, observadas no granito, sugerem a existência de um processo de alteração a baixa pressão e temperatura intermédia.

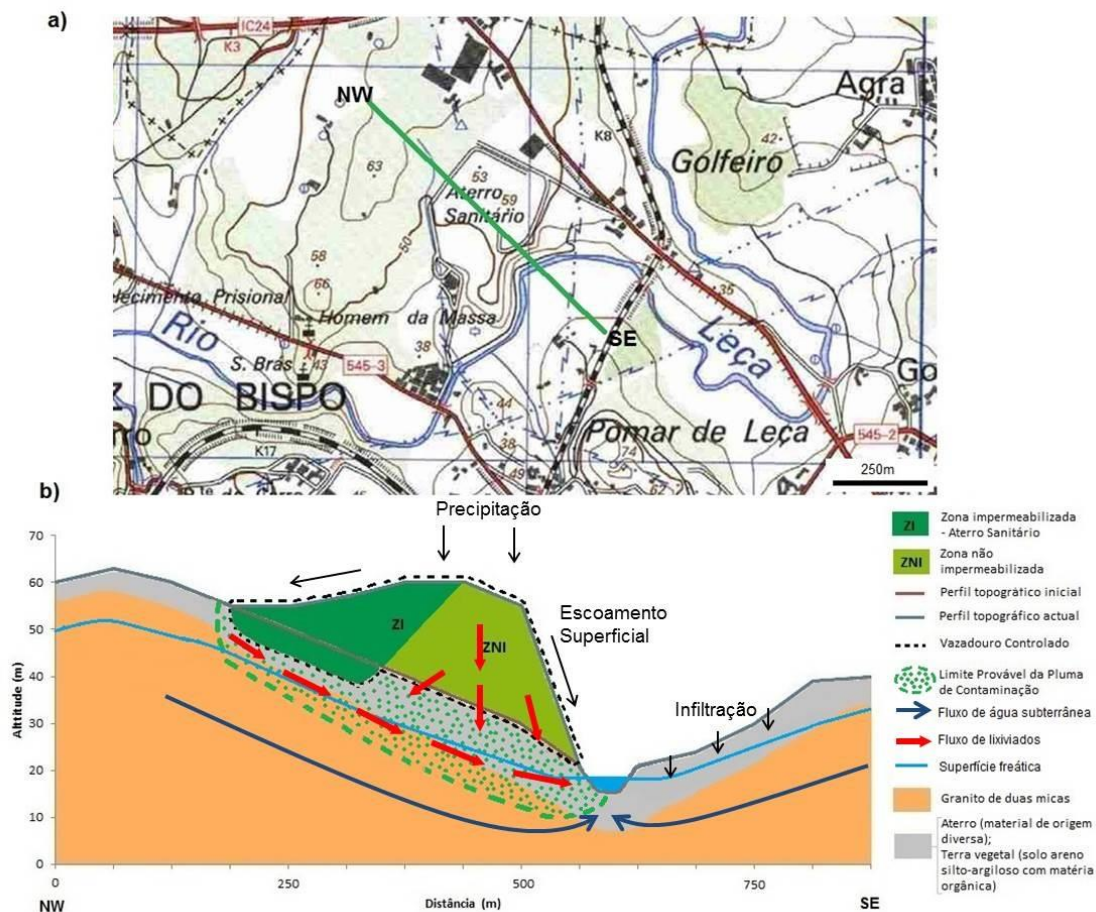


Figura IV.32 – Esquema do modelo hidrogeológico conceptual da área de estudo: a) localização do perfil NW-SE, na carta militar 110 à escala 1/25000 (IGeoE, 1998); b) modelo hidrogeológico a 2D, com inclusão dos limites do vazadouro controlado e das zonas impermeabilizada e não impermeabilizada do mesmo.

A informação recolhida sobre refracção sísmica, MASW e sondagens, foi interpretada em conjunto, tendo-se verificado uma concordância entre as três abordagens, o que permitiu descrever a zona Norte como uma área com uma camada superficial de solo residual granítico menos espessa (cerca de 5m) do que na zona Sul (cerca de 10m). A esta camada segue-se o maciço granítico menos alterado (W3/W4), que se encontra mais próximo da superfície e a cotas superiores na zona Norte uma vez que foi menos erodida por se apresentar mais resistente. Verificou-se também, através de sondagens e dos dados de sísmica que o comportamento mecânico do terreno se vai tornado mais rígido com o aumento da profundidade. Dessa forma o comportamento das formações geológicas condicionou a topografia actual, o que por sua vez condiciona a migração de fluídos das zonas de cota superior para as zonas de cota inferior. Esse facto associado ao conhecimento dos sistemas de fracturação existentes na área de estudo, permitiu definir a migração de fluidos oriundos do VC de NW para SE (fluxo principal) e de NNE para SSW (fluxo secundário).

Com a informação sísmica foi ainda possível verificar que na zona norte do VC o limite entre os resíduos e o meio não perturbado corresponde aos 2-3m de profundidade, o que está de acordo com a profundidade à qual foram colocadas as novas células de resíduos.

De acordo com o estudo efectuado, a evolução das anomalias de contaminação deverá estar relacionada com:

1. Topografia do local, uma vez que os perfis de resistividade com valores de resistividade mais altos se localizam a cotas mais elevadas, a norte do VC, não se verificando que a anomalia se estenda nesse sentido;
2. Circuitos hidrogeológicos, que estão relacionados com a fracturação, conforme verificado pela orientação das plumas de contaminação que estão de acordo com a tectónica dominante e com a orientação das linhas de água na envolvente ao VC;
3. Substrato geológico, que neste caso é granítico, funcionando como barreira à circulação de água contaminada, quer lateralmente quer em profundidade, conforme pode ser comprovado pela comparação entre os valores de resistividade mais elevados na zona norte do VC (maciço granítico mais à superfície) e os valores de resistividade mais baixos na zona sul, junto ao rio.

IV.2.2. VISUALIZAÇÃO A 3D

O programa *GeoMerge* foi desenvolvido através de uma colaboração desenvolvida com um grupo do IEETA (Instituto de Engenharia Electrónica e Telemática de Aveiro), mais concretamente o grupo de investigação em sistemas de visualização (*Laboratory of Information Systems and Telematics*). Este grupo foi adaptando o programa às necessidades descritas para este estudo e em particular para a integração e análise combinada das metodologias geofísicas e estatísticas envolvidas. Para além de ter a vantagem de ter sido feito à medida das necessidades da investigação em curso, teve igualmente a vantagem de ser um programa de acesso livre.

Este programa inclui o uso dos métodos estatísticos anteriormente descritos para a determinação da anomalia (*Iterative 2 σ* e *Calculated distribution function*), e permite analisar e visualizar os dados e a anomalia de forma tridimensional (3D). Para além da representação tridimensional, o programa utiliza técnicas para representar a incerteza e assim ajudar a evitar conclusões erradas. A interpolação é uma ferramenta que deve ser utilizada com precaução e, por esse motivo, foi incluída no programa a possibilidade de o utilizador compreender facilmente onde estão os dados reais (Streit et al., 2008).

Conforme descrito anteriormente, os algoritmos utilizados nos dois métodos não são aplicados, em profundidade, a todo o conjunto de dados, mas sim a intervalos de profundidade. Isto porque as propriedades das rochas (como a porosidade e a permeabilidade) variam com o aumento da profundidade. Para lidar com esta situação pode optar-se por fazer uma observação preliminar dos dados a 2D para avaliar de forma interactiva e visualmente o número de níveis de profundidade e, assim, definir os intervalos de profundidade que serão analisados, com vista à definição de valores anómalos e de *background* para cada gama de profundidades especificadas.

Certas ferramentas de *software*, tais como o *RockWorks*, não têm a opção de definir o que é anomalia e *background*, com base em métodos estatísticos, de modo que o utilizador tem de definir um valor arbitrário que representa o limiar entre anomalia e *background*, o que pode levar a erros de interpretação na avaliação global da área em estudo.

Actualmente, nenhum outro programa oferece todos os recursos simultaneamente integrados num único pacote como o *GeoMerge*, embora esses resultados possam ser obtidos através de um conjunto de ferramentas de *software* independentes (como por exemplo o uso e configuração manual de várias tabelas *Excel*), o tempo e o esforço necessários para produzir os mesmos resultados seria enorme e sem suporte visual a 3D (Gonçalves et al., 2012).

Para testar o programa *GeoMerge* fez-se um processamento inicial dos dados utilizando os mesmos perfis do capítulo IV.1.5 (1 a 13). Os testes efectuados revelaram que os resultados eram idênticos e portanto a metodologia estava a funcionar de igual forma. Assim sendo, juntaram-se os restantes perfis para fazer a interpretação global no *GeoMerge*.

IV.2.2.1. INTERPOLAÇÃO E INCERTEZA

Numa fase de interpretação de um conjunto de dados geofísicos e a fim de facilitar a nossa percepção dos dados a visualização dos mesmos deverá ser contínua e sem lacunas, facilitando a exploração, a análise e a documentação dos dados, mesmo que o processo de visualização se torne mais complexo (Gonçalves et al., 2011). A interpolação baseada em métodos geoestatísticos tem, em princípio, o potencial para produzir resultados mais realísticos em dados geofísicos do subsolo relativamente a outros métodos que baseiam a estimativa em princípios lineares e geométricos. Por exemplo os métodos de interpolação linear ou trilinear, entre outros, baseiam a estimativa, num determinado ponto do espaço, em regras de proporção de afastamento a pontos da variável conhecida. Estes métodos são usados ocasionalmente para obter rapidamente uma visão geral ou quando os dados não são dispersos. Neste caso estes métodos foram rejeitados, uma vez que as propriedades do subsolo normalmente não seguem uma distribuição linear.

Foi assim utilizada uma interpolação geoestatística, designada por *kriging* ordinário, para criar uma grelha regular anisotrópica (Gonçalves et al., 2012). Este foi o método escolhido uma vez que, tratando-se de um meio natural em que a variável é do tipo regionalizada (Landim et al, 2002) normalmente produz os melhores resultados, ou seja, uma menor diferença entre os valores estimados por interpolação e os reais.

Vários testes comparativos realizados entre *kriging* ordinário, *kriging* universal e dois tipos do método do inverso da distância, comprovaram que o *kriging* quase sempre produz os melhores resultados (20 a 30% melhor que o inverso da distância) e que o *kriging* ordinário produz resultados ligeiramente melhores que o *kriging* universal (Parrot et al., 1993).

A implementação do *kriging* ordinário utilizada foi feita através de uma ferramenta de *Matlab* aberta conhecida por *EasyKrig 3.0* (Chu, 2004), que permitiu gerar um volume de dados 3D com base nas secções de resistividade 2D originais. O processo envolvido inclui a exportação dos dados 3D para o *EasyKrig 3.0*, e a importação do volume interpolado daí resultante para o *GeoMerge*.

Um erro comum na visualização de dados interpolados é o facto de estes serem representados da mesma forma que os dados originais, o que pode levar a erros e más interpretações na avaliação da visualização resultante (Streit et al., 2008). A representação da incerteza em dados volumétricos pode ser feita de duas formas: mapeando a incerteza através de uma peça de dados adicionais ou integrando-a nos dados volumétricos através de cor, transparência, etc. (Djurcilov et al., 2001 e Djurcilov et al., 2002). Contudo, no programa *GeoMerge* foi incluída a possibilidade de a incerteza ser interactiva, para que o utilizador possa controlar o grau de dados interpolados que pretende analisar (Fig. IV.33).

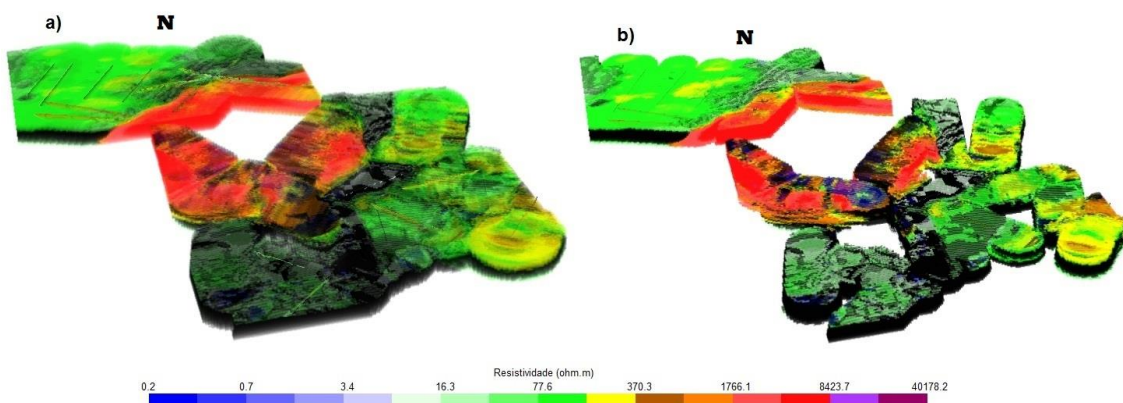


Figura IV.33 – Exemplo da representação da incerteza no cálculo do volume no programa *GeoMerge*: a) maior incerteza; b) menor incerteza.

Esta estratégia, comparativamente às propostas de Djurcilov et al., 2001 e Djurcilov et al., 2002, tem a vantagem de evitar a distorção dos dados ou a sobreposição de dados e transmite igualmente a incerteza associada a dados interpolados (Gonçalves et al.,

2012). A incerteza foi calculada como função da distância ao ponto mais próximo, o que significa que os dados interpolados a maior distância têm um grau de incerteza maior (Gonçalves et al., 2012).

IV.2.2.2. VISUALIZAÇÃO DA ANOMALIA

No programa *GeoMerge* há a possibilidade de visualizar as secções de resistividade a 2D, com e sem a representação da anomalia (Fig. IV.34). Foi utilizado o mesmo tipo de escala de cores que é utilizada nas secções de resistividade do programa RES2DINV (cores frias para resistividades baixas e cores quentes para resistividades elevadas), e a anomalia foi representada a preto para não colidir com a escala de cores e por ser mais perceptível visualmente. Foi aplicada a correcção topográfica a cada secção para garantir o correcto alinhamento dos dados em relação à profundidade.

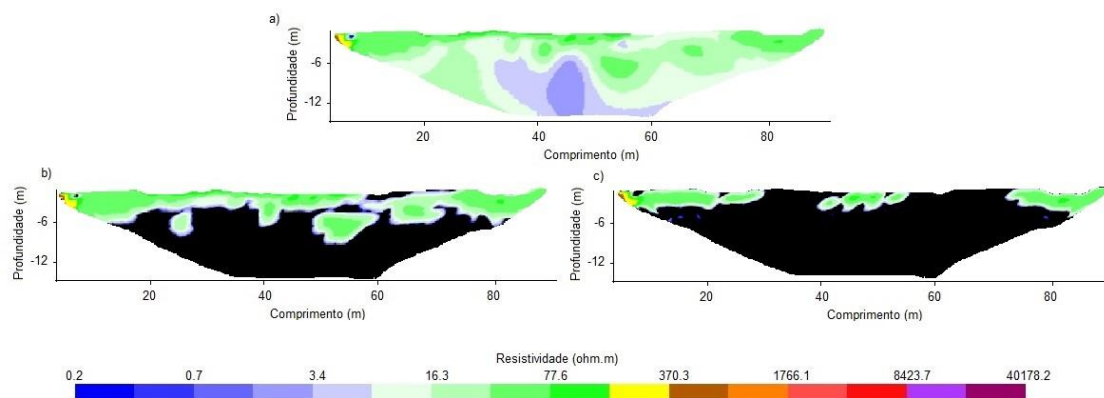


Figura IV.34 – Exemplo da representação da secção do perfil 12 no programa *GeoMerge*: a) sem representação da anomalia; b) com representação da anomalia (preto), pelo método *Calculated distribution function*; c) com representação da anomalia (preto), pelo método *Iterative 2σ*.

Pela análise da figura IV.34, verifica-se que o método *Iterative 2σ* é mais abrangente em termos de definição da anomalia do que o método *Calculated distribution function*, uma vez que considera maior quantidade de dados como anomalia. A anomalia é mais limitada no método *Calculated distribution function*, incluindo valores mais baixos, tendência que já se verificava quando foi considerado um menor número de dados de resistividade total (capítulo IV.1.5.).

Pode prever-se, para um estudo desta natureza, a realização de um número mínimo de perfis de resistividade que permitam obter um número de dados representativos da área de estudo. Neste caso os dados relativos aos perfis 1-13 foram suficientes para definir com clareza a anomalia. Os restantes dados permitiram uma análise complementar e mais detalhada do problema, com uma maior consistência na delimitação da anomalia permitindo também avaliar a sua eventual ausência em algumas zonas mais afastadas.

Existe também a opção de visualização no *GeoMerge* das secções a 2D no espaço tridimensional (Fig. IV.35 e 36), o que torna possível detectar continuidades e tendências entre as diferentes secções.

Este posicionamento é efectuado com base nas coordenadas de início e fim da secção e a sua profundidade é corrigida de acordo com o modelo digital topográfico do terreno. No programa foi inserida uma imagem georreferenciada sobre a superfície do terreno, para facilitar a contextualização da interpretação da posição da anomalia no terreno (Fig. IV.35 e 36).

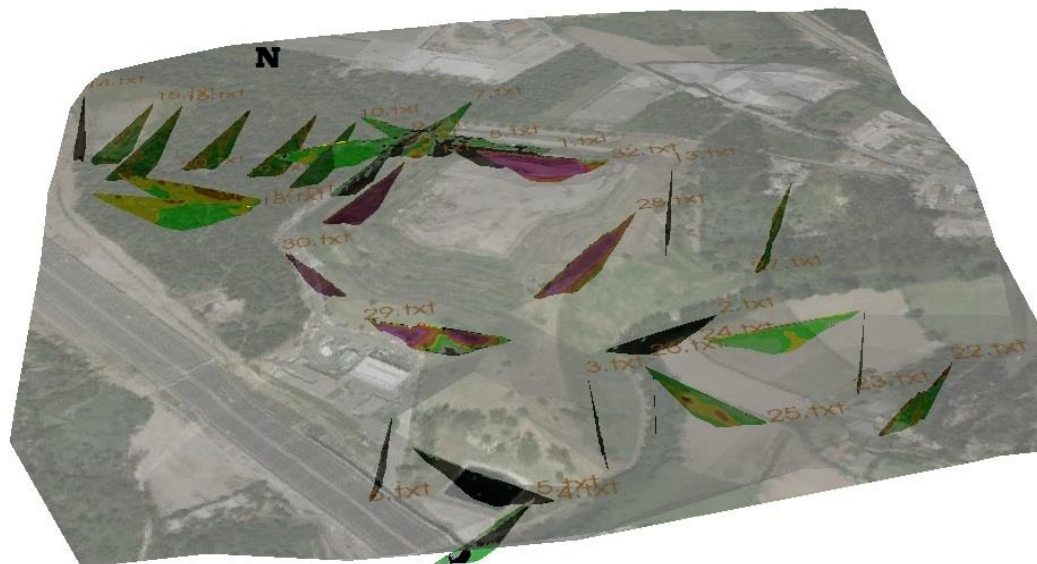


Figura IV.35 – Representação das secções dos perfis 1 a 32 no espaço 3D, com representação da anomalia (preto), para o método *Calculated distribution function*, sob a superfície do terreno (representada por uma imagem georreferenciada).

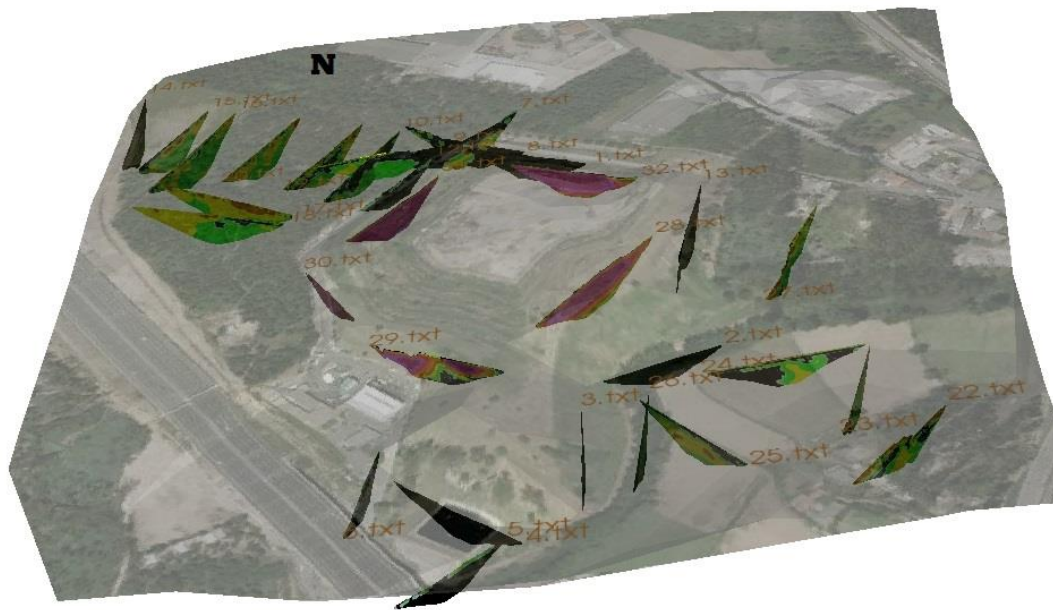


Figura IV.36 – Representação das secções dos perfis 1 a 32 no espaço 3D, com representação da anomalia (preto), para o método *Iterative 2σ*, sob a superfície do terreno (representada por uma imagem georreferenciada).

Para além destas funcionalidades, o programa *GeoMerge* permite ainda representar a anomalia em 3D, com base no processo de *kriging* anteriormente referido. O volume da anomalia pode também ser calculado. Utilizando o método *Calculated distribution function*, o volume de anomalia no bloco norte é de 423492m^3 e no bloco sul é de 3180510m^3 , o que representa 3604002m^3 no total. No caso do método *Iterative 2σ*, o volume de anomalia no bloco norte é de 2125550m^3 e no bloco sul é de 4209080m^3 , 6334630m^3 no total. Em ambos os métodos utilizados é possível verificar que o volume da anomalia é maior na zona sul do VC do que na zona norte do VC. O volume definido pelo método *Iterative 2σ* é sempre maior do que o volume definido pelo método *Calculated distribution function*.

Foi ainda acrescentada uma funcionalidade ao programa *GeoMerge*, que permite visualizar apenas o volume correspondente à anomalia, representado a preto (Fig. IV.37).

O que foi descrito anteriormente, com os cálculos referentes ao volume da anomalia, confirma-se visualmente na Fig. IV.37, ou seja, uma menor extensão da anomalia a norte em ambos os métodos e um volume de anomalia globalmente maior no caso do método *Iterative 2σ*.

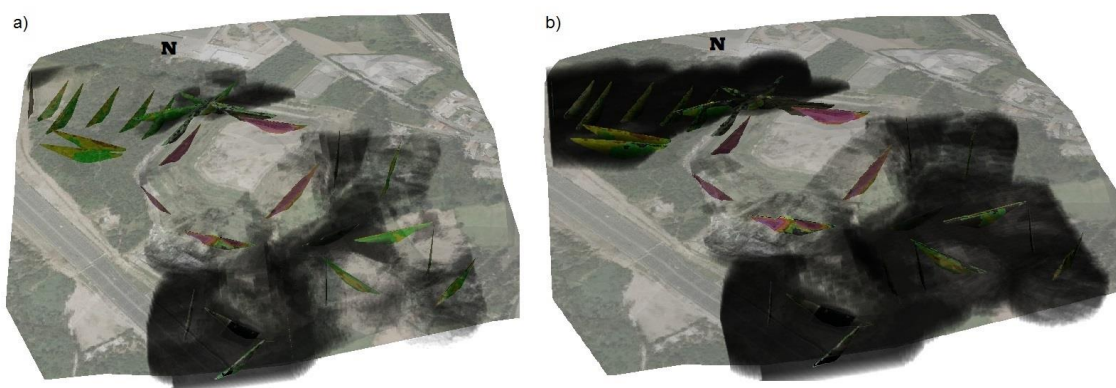


Figura IV.37 – Representação do volume da anomalia: a) para o método *Calculated distribution function*; b) para o método *Iterative 2σ*.

Em termos de delimitação da anomalia verifica-se que o método *Calculated distribution function* (Fig. IV. 37a e Fig. IV. 38-2) está mais de acordo com os limites definidos no esboço preliminar efectuado no capítulo IV.1.2. (Fig. IV.7), feito apenas com base nos dados de RE.

Se compararmos os dois métodos estatísticos em termos ambientais e económicos podemos inferir que o método *Iterative 2σ* poderá ser mais indicado quando as questões ambientais se sobrepõe, uma vez que é mais conservador na delimitação da anomalia e como tal dá uma margem maior para o local a ser ambientalmente remediado. Por outro lado se a questão económica se impuser, o método *Calculated distribution function* poderá ser mais indicado, porque delimita uma área mais restrita a ser remediada. No entanto ambos os métodos são indicados para a definição da anomalia, mesmo com um menor número de dados de resistividade, o que se trata de uma vantagem em termos de custos e de tempo, se compararmos com outros métodos de investigação directa do subsolo.

No programa *GeoMerge* é também possível observar a distribuição da anomalia para determinadas profundidades pré-definidas (0-1m, 5m, 10m, 15m), para o método *Calculated distribution function* (Fig. IV.38, imagens 1 a 4) e para o método *Iterative 2σ* (Fig. IV.38, imagens 5 a 8).

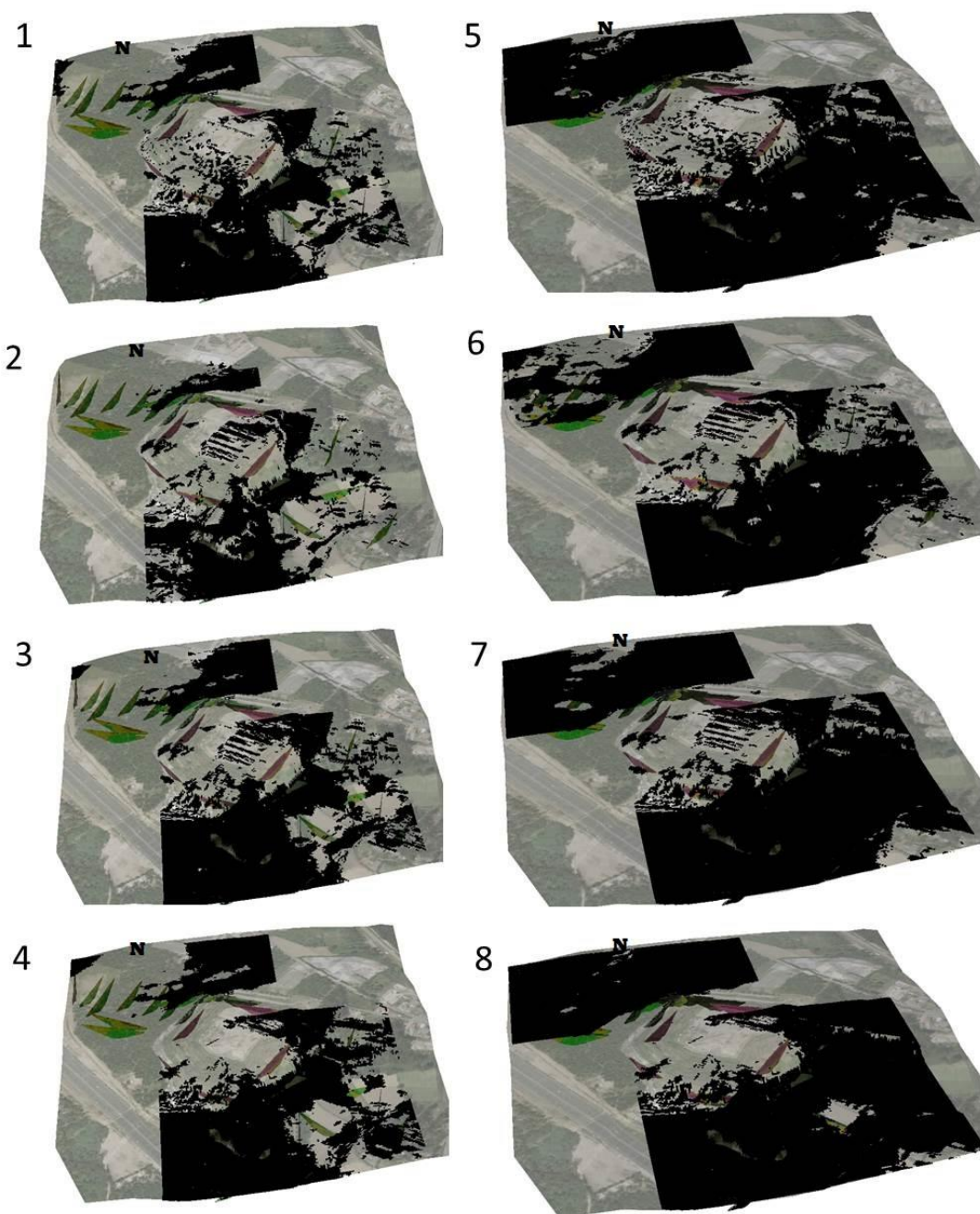


Figura IV.38 – Representação da anomalia por profundidades. Com o método *Calculated distribution function*: 1 - 0-1m, 2- 5m, 3 - 10m, 4 - 15m. Com o método *Iterative 2σ*: 5 - 0-1m, 6- 5m, 7 - 10m, 8 - 15m.

Em termos de visualização da anomalia em profundidade verifica-se igualmente a tendência já descrita, de anomalia mais extensa no caso do método *Iterative 2σ*. Em ambos os métodos observa-se que a extensão da anomalia é maior à superfície, sendo mais reduzida aos 5m de profundidade, voltando a aumentar aos 10m e aos 15m de profundidade. As diferenças observadas nos limites da anomalia para os quatro níveis de profundidade ilustrados ocorrem porque as propriedades do meio

variam com a profundidade. Motivo pelo qual os algoritmos dos dois métodos estatísticos foram aplicados a intervalos de profundidade e não ao conjunto total de dados.

Em termos de valores de resistividade, verifica-se que à superfície (0-1m) o limite entre anomalia/background é mais elevado, correspondendo a $95\Omega.m$ para o método *Calculated distribution function*, e $453\Omega.m$ para o método *Iterative 2σ* . Para a profundidade de 5m o limite anomalia/background é mais baixo ($50\Omega.m$ - *Calculated distribution function*, $236\Omega.m$ - *Iterative 2σ*). Para as profundidades inferiores (10m e 15m) o limite anomalia/background volta a aumentar ($99\Omega.m$ - *Calculated distribution function*, $269\Omega.m$ - *Iterative 2σ*). Assim sendo, confirma-se a relevância da aplicação dos critérios estatísticos por profundidades, uma vez que se estivesse a ser aplicado apenas um valor limite anomalia/background, para todas as profundidades, a anomalia seria mal interpretada.

Para validar os métodos estatísticos utilizados no cálculo da anomalia para a área de estudo e a fim de avaliar a verdadeira extensão da contaminação nas águas subterrâneas da área de estudo, foram também incluídos no programa os dados relativos às amostras de água subterrânea. Foram definidos cilindros para representar os locais de recolha de águas subterrâneas e a sua profundidade (Fig. IV.39 e 40), utilizando o VMR de condutividade para águas de consumo humano como referência (D-L 236/98 e D-L 243/2001). Assim sendo, os cilindros vermelhos representam águas subterrâneas contaminadas (valores de condutividade superiores a $400\mu S/cm$, ou seja, resistividades inferiores a $25\Omega.m$), os amarelos indicam águas subterrâneas não contaminadas (condutividades inferiores a $400\mu S/cm$).

A figura IV.39 representa a anomalia (preto) e os valores de resistividade obtidos nos piezómetros 1 e 3 em maio de 2011. O valor no piezómetro 1 é de $24.3\Omega.m$ e o valor no piezómetro 3 é de $7.52\Omega.m$, representados ambos a vermelho por serem consideradas águas subterrâneas contaminadas. Comparando visualmente, verifica-se que estes valores analíticos contaminados estão em locais onde se representa a mancha correspondente à anomalia obtida por métodos estatísticos.

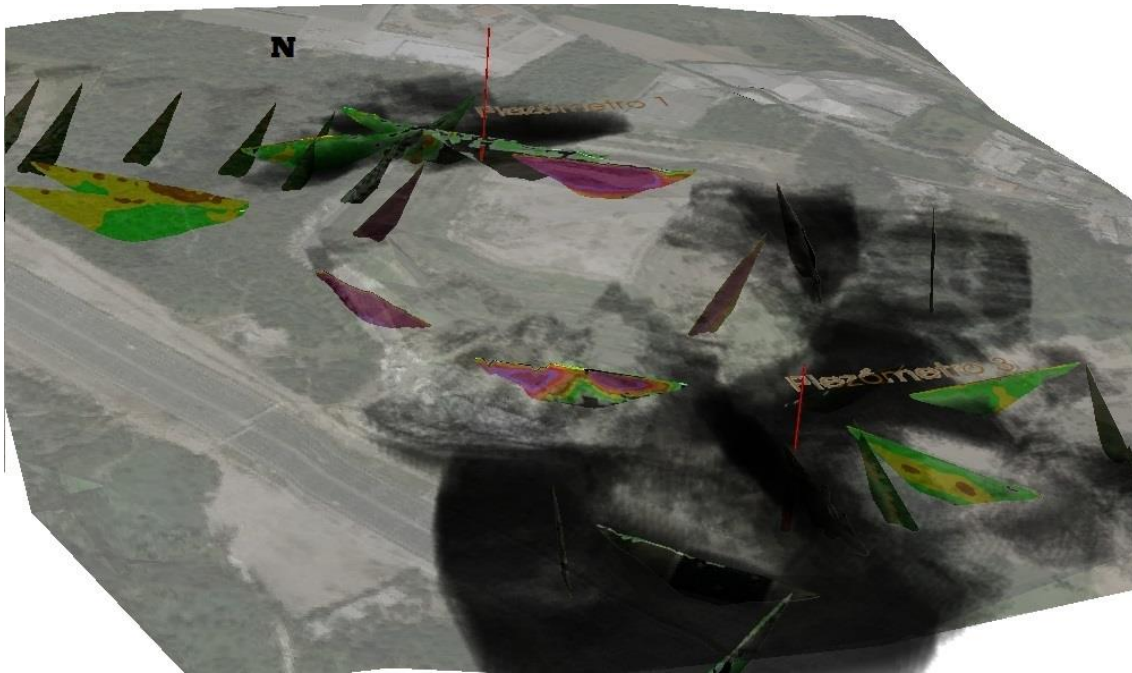


Figura IV.39 – Representação da resistividade nas análises de água relativas a maio de 2011, com a anomalia de resistividade definida pelo método *Calculated distribution function*: cilindros vermelhos – com contaminação; cilindros amarelos – sem contaminação.

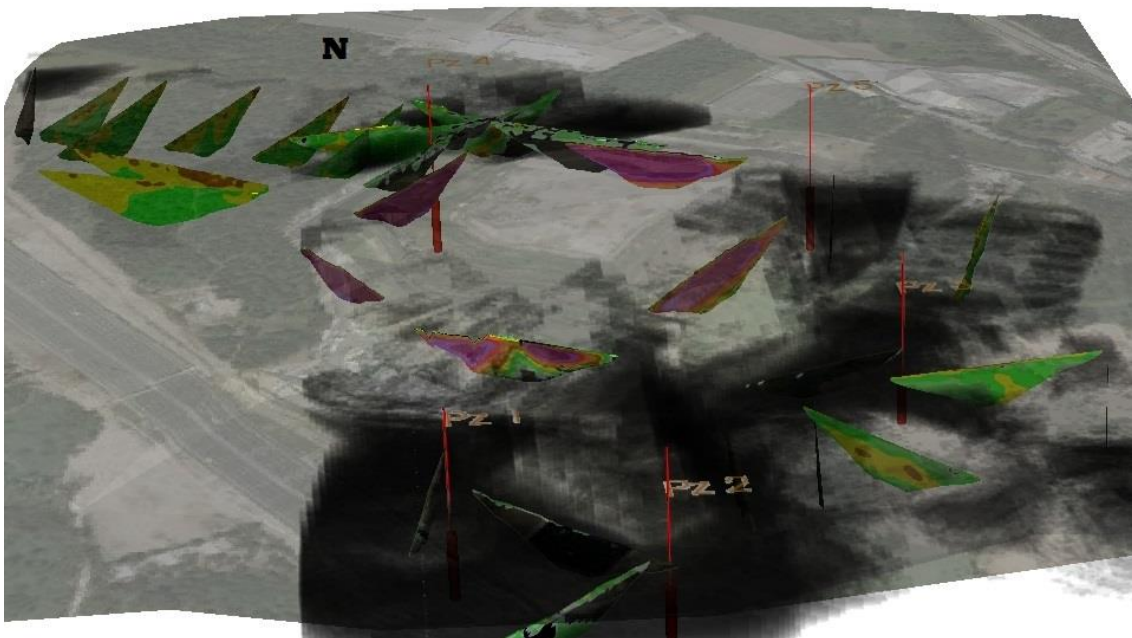


Figura IV.40 – Representação da resistividade nas análises de água relativas a abril de 2012, com a anomalia de resistividade definida pelo método *Calculated distribution function*: cilindros vermelhos – com contaminação; cilindros amarelos – sem contaminação.

Observa-se a mesma situação nas análises de água subterrânea obtidas em abril de 2012 onde todos os valores considerados como contaminação (cilindros vermelhos) se encontram em locais onde a anomalia foi identificada por métodos estatísticos (Fig. IV.40).

A vantagem deste tipo de visualização, integrando o volume da anomalia de resistividade com os valores da condutividade nas águas subterrâneas, reside na rapidez de observação das diversas datas de análises que se pretendem estudar. Esta opção permite visualizar a evolução da contaminação com o tempo, de forma imediata, por sobreposição de dados directos e indirectos, contrariamente à demorada análise efectuada no capítulo IV.1.4.

Os resultados confirmam que a anomalia de resistividade, obtida por métodos estatísticos incluídos no programa *GeoMerge*, está em conformidade com a análise directa de amostras de água subterrânea. Consequentemente demonstra a viabilidade do método da RE e dos métodos estatísticos, para realizar este tipo de estudo, resultando numa análise mais rápida, eficiente e económica.



CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

V.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se pretende avaliar a dispersão da contaminação na área envolvente a um Vazadouro Controlado é necessário efectuar um conjunto de estudos que permitam caracterizar e monitorizar ambientalmente essas zonas. Os estudos envolvidos neste tipo de avaliação têm sofrido um desenvolvimento cada vez maior em termos de leque de trabalhos interdisciplinares envolvidos. Pelo facto de envolverem a interligação de várias áreas científicas, permitem um conhecimento mais aprofundado do problema, o que possibilitará a adopção da solução mais adequada para cada caso.

Os métodos de prospecção geofísica constituem uma importante ferramenta para avaliação ambiental de uma área onde se procede ao confinamento de resíduos, motivo pelo qual foram utilizados na área de estudo, onde não existia qualquer tipo de trabalho desta natureza.

Tratando-se de um estudo multidisciplinar, além dos estudos geofísicos, foram também englobados estudos geológicos, geoquímicos e estatísticos, permitindo assim uma avaliação integrada do problema ambiental.

Com a realização dos primeiros perfis pelo método da resistividade eléctrica (1 a 13), foi possível identificar duas plumas de contaminação provenientes do VC (uma a norte e outra a sul do VC). Verificou-se que os dados obtidos através do método electromagnético indutivo, apesar das suas limitações, estão em conformidade com os dados de resistividade eléctrica (RE) obtidos nos mesmos locais.

Com a realização da totalidade dos perfis de RE as plumas de contaminação foram confirmadas e delimitadas. Foram também definidas áreas contaminadas ($\text{resistividade} < 30 \Omega \cdot \text{m}$), pouco contaminadas ($30 \Omega \cdot \text{m} < \text{resistividade} < 200 \Omega \cdot \text{m}$) e não contaminadas ($\text{resistividade} > 200 \Omega \cdot \text{m}$), tendo por base apenas critérios empíricos, também utilizados por outros autores.

Verificou-se que a pluma de contaminação a sul do VC é mais extensa e apresenta valores de RE mais baixos que a pluma a norte do VC. Detectou-se que ambas as

plumas se atenuam com o progressivo afastamento ao VC e que o rio Leça está a funcionar como barreira à contaminação proveniente do VC.

Com a realização dos perfis de RE no topo do VC (28 a 32), foi possível confirmar a existência das duas zonas que compõe o VC (antiga lixeira sem impermeabilização na base e Aterro Sanitário com três alvéolos devidamente impermeabilizados), das camadas de cobertura da massa de resíduos e do início da zona contaminada imediatamente abaixo da área do VC que não está impermeabilizada na base (antiga lixeira). Com os perfis de RE realizados não foram detectadas rupturas nas camadas de impermeabilização utilizadas na base e topo do VC, no entanto a pluma de contaminação da zona norte, poderá estar relacionada com alguma falha na camada impermeabilizante nessa zona. Uma outra possibilidade poderá estar relacionada com a subida do nível freático na zona não impermeabilizada do VC que poderia justificar um gradiente hidráulico capaz de dispersar a pluma da zona sul para a zona norte.

Os valores de RE obtidos em diferentes épocas do ano ou com um ano de separação entre si, não apresentam diferenças significativas, continuando a definir a pluma no mesmo local e com valores de resistividade muito semelhantes, motivo pelo qual não foi realizada uma nova campanha geofísica em todos os locais iniciais.

Os dados obtidos pelo método da refração sísmica permitiram identificar uma camada superficial (com $V_P < 800\text{m/s}$) menos espessa na zona norte (com cerca de 5m de espessura) do que a zona sul (com cerca de 10m de espessura). A esta camada segue-se um maciço granítico com graus de alteração graduais ($1000\text{m/s} < V_P < 4600\text{m/s}$), que se encontra mais próximo da superfície e a cotas superiores na zona norte, que foi menos erodida precisamente por se apresentar mais resistente.

Os valores das V_S obtidos através do método MASW estão de acordo com os valores das V_P obtidos pelo método da refração sísmica, confirmando as características do terreno atravessado pelas ondas sísmicas, evidenciando que o comportamento mecânico do terreno se vai tornando cada vez mais rígido em profundidade.

Pela análise da V_S foi também possível distinguir o limite entre células contendo resíduos e solos não perturbados. Os valores encontrados (2m na zona norte e 3m na

zona sul) estão de acordo com a profundidade (do projecto) à qual as novas células de resíduos foram colocadas.

Nos locais onde as velocidades das ondas sísmicas são mais baixas verificaram-se também valores baixos de resistividade, característicos da presença de resíduos urbanos. À medida que os valores de resistividade vão aumentando em profundidade as V_P e V_S também aumentam.

Os resultados obtidos pelos diferentes métodos geofísicos (resistividade eléctrica, electromagnética e sísmica) são concordantes na definição das características inerentes à delimitação das plumas de contaminação provenientes do VC.

A validação dos resultados obtidos através dos métodos geofísicos, indirectos, foi obtida com recurso a estudos directos: geológicos, análises físico-químicas de águas e métodos estatísticos.

Foram recolhidas amostras de água dos piezómetros a montante e a jusante do VC entre 2005 e 2012, e foram também recolhidas algumas amostras de água em locais fora da influência do VC para detectar efectivamente quais os valores que representam contaminação e quais os que representam valores de *background* da área de estudo e assim permitiram validar os métodos geofísicos. Tendo em atenção que estamos a medir diferentes meios (solo+água vs água), verifica-se que os valores obtidos de forma directa (análises de água) estão de acordo com os valores obtidos de forma indirecta (método da resistividade eléctrica). Esta constatação foi confirmada, através desses mesmos elementos, uma vez que foram calculados valores de porosidade que correspondem a valores semelhantes aos referidos na bibliografia. Os valores de RE, obtidos através das análises de água, são também mais baixos na zona a jusante do VC.

Os elementos encontrados nas águas subterrâneas, muitos deles excedendo largamente os VMR e VMA para águas de consumo humano, permitiram confirmar a existência de contaminação e indicar a origem provável dessa contaminação.

Com a elaboração do modelo hidrogeológico para a área de estudo foi possível integrar diversa informação recolhida e verificar que a evolução da pluma de contaminação deverá estar relacionada com a topografia do local (os valores de RE

mais altos localizam-se a cotas mais elevadas, a norte do VC, não se verificando que a anomalia se estenda nesse sentido), com os circuitos hidrogeológicos (relacionados com a fracturação, conforme verificado pela orientação das plumas de contaminação que estão de acordo com a tectónica dominante, com a orientação das linhas de água na envolvente ao VC e com o gradiente hidráulico regional) e com o substrato geológico granítico (funcionando como barreira à circulação de água contaminada, quer lateralmente quer em profundidade).

Com vista ao desenvolvimento de uma metodologia mais objectiva para a definição de plumas de contaminação foram utilizados métodos estatísticos (*Iterative 2 σ* e *Calculated distribution function*). Após os métodos terem sido devidamente testados, verificou-se que a sua aplicação aos dados geofísicos em estudo era adequada e permitia definir um limite entre anomalia e *background* de forma criteriosa, sem o tipo de incerteza e ambiguidade normalmente característica da utilização de métodos empíricos.

A inclusão dos algoritmos utilizados nos dois métodos estatísticos num programa de visualização tridimensional (*GeoMerge*) permitiu distinguir as zonas contaminadas e não contaminadas da área de estudo a duas e a três dimensões.

Verifica-se que o método *Iterative 2 σ* é mais abrangente, em termos de definição da anomalia, do que o método *Calculated distribution function*, uma vez que considera maior quantidade de dados como anomalia. A anomalia é mais limitada no método *Calculated distribution function*, incluindo valores de RE mais baixos.

Em termos de delimitação da anomalia verifica-se que o método *Calculated distribution function* está em maior concordância com os limites definidos apenas com base em critérios empíricos aplicados aos dados de RE.

A potencialidade do programa *GeoMerge* para calcular volumes permitiu determinar que o volume anómalo é maior na zona sul do VC do que na zona norte do VC, tal como esperado. Verificou-se também que o volume definido pelo método *Iterative 2 σ* é sempre maior do que o volume definido pelo método *Calculated distribution function*.

Os resultados anómalos obtidos pelo método da RE, aos quais foram aplicados critérios estatísticos, estão de acordo com os resultados de contaminação obtidos nas

amostras de água subterrânea. Verifica-se que os locais onde foram detectadas águas subterrâneas contaminadas estão em zonas onde se representa a mancha correspondente à anomalia obtida por métodos estatísticos. O que demonstra a viabilidade do método da RE e dos métodos estatísticos, para realizar este tipo de avaliação, resultando numa análise mais rápida, eficiente e económica.

Comparando os dois métodos estatísticos, em termos ambientais e económicos, podemos inferir que o método *Iterative 2σ* poderá ser mais indicado quando as questões ambientais se sobrepõe, uma vez que é mais preventivo na delimitação da anomalia e como tal dá uma margem maior para o local a ser ambientalmente remediado. Por outro lado, se a questão económica se impuser, o método *Calculated distribution function* poderá ser mais indicado, porque delimita uma área mais restrita a ser remediada. No entanto ambos os métodos são indicados para a definição da anomalia, mesmo com um menor número de dados de RE, o que corresponde a uma vantagem em termos de custos e de tempo, se compararmos com outros métodos de investigação directa do subsolo.

Em termos ambientais, a metodologia aqui apresentada é relevante pois não potencia a contaminação, uma vez que não são necessárias perfurações, e permite ter uma ideia global da área contaminada no local em estudo e assim ajudar à remediação de locais contaminados de uma forma mais eficiente e económica.

A metodologia pode ser aplicada a qualquer outro local de deposição de RSU, em qualquer tipo de contexto geológico, adaptando a recolha de dados a cada caso em particular, permitindo comparar diferentes plumas de contaminação em diferentes locais em termos volumétricos.

V.2. TRABALHOS FUTUROS

Tendo em consideração que certas funcionalidades do programa GeoMerge ainda não foram completamente implementadas pretende-se, a curto prazo, colmatar algumas lacunas, nomeadamente:

- Integrar as informações mais relevantes relativas ao modelo hidrogeológico que foi criado para a área de estudo;

- Encontrar uma abordagem mais determinística para a definição dos níveis de profundidade a adoptar em cada caso específico, de forma a poder vir a ser um parâmetro do próprio *software*;
- Incluir funcionalidades adicionais no programa, tais como o cálculo de vários parâmetros estatísticos para cada intervalo de profundidade, e ferramentas para visualizar gráficos ou tabelas de toda a análise estatística (que até ao momento tem de ser efectuados separadamente);
- Efectuar a projecção à superfície do volume anómalo em profundidade e, dessa forma, poder ser feito um planeamento e previsão da evolução da pluma em termos geográficos (no sentido X,Y);
- Incorporar no próprio programa a interpolação dos dados (processo de *krigagem*);
- Refinar o programa em termos visuais para melhorar a observação da mancha correspondente à anomalia e dos cilindros que representam as águas subterrâneas contaminadas e não contaminadas;
- Efectuar correlação entre vários parâmetros físicos, caso sejam colhidos dados de outra natureza, nomeadamente os geofísicos, que permitam igualmente interpolar volumes.

Pretende-se, igualmente num futuro próximo, aplicar a metodologia aqui descrita a outros locais de deposição de RSU, em diferentes contextos geológicos e, dessa forma, tirar partido desta ferramenta a qual deverá permitir efectuar a comparação dos diversos resultados e contextos estudados.

Para verificar a evolução das plumas de contaminação na área estudada, ao fim de 5 anos, prevê-se a realização de novas campanhas geofísicas utilizando os métodos da RE nos locais identificados com contaminação.



CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Zeid, N., Bianchini, G., Santarato, G. & Vaccaro, C. (2004) - Geochemical characterization and geophysical mapping of landfills: the Marozzo canal study (NE Italy). *Environmental Geology* 45, 439–447 (45).
- Abranches, M.C.B., Canilho, M.H. & Canêlhas, M.G.S. (1979) - Idade absoluta pelo método do Rb-Sr dos granitos do Porto e de Portalegre (Nota preliminar). *Boletim Soc Geol Portugal XXI*: 239–248.
- Almeida, A. (2001) - Caracterização geoquímica e geocronológica do granito de duas micas sintectónico do Porto (NW de Portugal). In Lago M., Arranz E. & Galé C. (eds): *Proceedings IIIer Congreso Ibérico de Geoquímica/VIIIº Congreso de Geoquímica de España*. Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza. 311-315.
- Al-Tarazi, E., El-Naqa, A., El-Waheidi, M. & Abu Rajab, J. (2006) - Electrical geophysical and hydrogeological investigations of groundwater aquifers in Ruseifa municipal landfill, Jordan. *Environmental Geology* 50, 1095–1103.
- Al-Tarazi, E., Abu Rajab, J., Al-Naqa, A. & El-Waheidi, M. (2008) - Detecting leachate plumes and groundwater pollution at Ruseifa municipal landfill utilizing VLF-EM method. *Journal of Applied Geophysics* 65, 121–131.
- Aristodemou, E. & Thomas-Betts, A. (2000) - DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics* 44, 275–302.
- Antas, A. (1987) - Política de Gestão de Resíduos em Portugal. *Actas do Colóquio sobre Resíduos Tóxicos e/ou Perigosos, Direcção Geral da Qualidade do Ambiente Lisboa*, pp. 1-10.
- Auken, E., Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J. & Christiansen, A. V. (2011) - Mapping of Landfills using Time-domain Spectral Induced Polarization Data - The Eskelund Case Study. *Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Leicester, UK, September 12-14*. Extended Abstract E-14.
- Baedecker, M.J., & Apgar, M.A. (1984) - Hydrochemical studies at a landfill in Delaware. In: Bredehoeft, J. _Ed., *Groundwater Contamination*. National Academy Press, Washington DC, p. 127–138.
- Bath, M. (1973) - *Introduction to seismology*. A Halsted Press Book, 395 pp.

- Bavusi, M., Rizzo, E. & Lapenna, V. (2006) - Electromagnetic methods to characterize the Savoia di Lucania waste dump (Southern Italy). *Environmental Geology* 51, 301–308.
- Benson, R., Glaccum, R., & Noel, M. (1983) - Geophysical techniques for sensing buried waste and waste migration Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research Development, US Environmental Protection. Agency, Las Vegas, NV, Rep. 68-03-3050, 114.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T. & Hogland, W. (2000) - DC-resistivity mapping of the internal landfills structure: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology* 39, 360–371.
- Beven, K.J. (2001) - Rainfall-runoff modelling. JohnWiley & Sons, Chichester, 360 pp.
- Bortolin, J. R. M. & Malagutti Filho, W. (2011) - Monitoramento temporal de contaminação por chorume usando métodos geoeletricos. Extended Abstract. 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18. Brazilian Geophysical Society.
- Brewster, M. L., Annan, A. P., Greenhouse, J. P., Kueper, B. H., Olhoeft, G. R., Redman, J. D., & Sander, K. A. (1995) - Observed migration of a controlled DNAPL. *Geophysical Methods Groundwater*, 33, 977–87.
- Burger, H. R. (2006) - Introduction to Applied Geophysics: Exploring The Shallow Subsurface. Anne F. Sheehan, Craig H. Jones editors. W W Norton & Company Incorporated. 600pp.
- BURVAL Working Group (2006) - Groundwater resources in buried valleys – A challenge for geosciences, ed R. Kirsch, H.M. Rumpel, W. Scheer, and H. Wiederhold. Hannover, Germany: Leibniz Institute f Appl. Geosciences.
- Calkin, S. (1989) - A shallow seismic refraction survey of the Mallard North Landfill — Hanover Park, IL. MS thesis, Northern Illinois University.
- Carpenter, P.J., Calkin, S.F. & Kaufmann, R.S. (1991) - Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques, *Geophysics*, 56, 1896–1904.
- Carrington da Costa, J. & Teixeira, C. (1957) - Notícia explicativa da Folha 9-C (Porto) da Carta Geológica de Portugal, à escala 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

- Carrington da Costa, J. & Teixeira, C. (1957) - Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Cartwright, K. & McComas, M. R., (1968) - Geophysical surveys in the vicinity of sanitary landfills in northeastern Illinois, Ground Water, 23-30.
- Caterpillar Tractor Company (1982) - Caterpillar Performance Handbook, Edition 13, Section 1-10, Caterpillar Tractor Company, Peoria, Illinois.
- Chaminé, H. I. (2000) - Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho – Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas. Universidade do Porto. 497 pp.
- Chaminé, H., Gama Pereira, L. C., Fonseca, P. E., Noronha, F. & Lemos de Sousa, M. J., (2003) – Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar, entre as Zonas Centro-Ibéricas e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe, 28, 37-78.
- Chian, E. & DeWalle, F. (1976) - Sanitary landfill leachates and their treatment. J. Environ. Eng. ASCE 102 (2): 441.
- Chu, D. (2004) - The GLOBEC Kriging Software Package – EasyKrig3.0. 2004. Disponível em http://globec.who.edu/software/kriging/easy_krig/easy_k.
- Coxito Afonso, M. J. (2003) - Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto (NW de Portugal). Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe, 28, 173-192.
- Dahlin, T., Rosqvist, H. & Leroux. V. (2010) - Resistivity-IP mapping for landfill applications. Near Surface Geoscience. First break vol. 28, 101-105.
- Dallmeyer, R. D. & Martinez-Garcia, E. (1990) – Introduction to the Pre-Mesozoic Geology of Iberia. In: Dallmeyer, R. D., Martinez-Garcia, E., Eds, Pre-Mesozoic Geology of Iberia. Springer Verlag. Berlin: 3-4.
- Daniels, F. & Alberty, R. A. (1966) - Physical Chemistry. John Wiley and Sons, Inc.
- Decreto-Lei 488/85, de 25 de Novembro – Relativo ao regime jurídico da gestão de resíduos. Diário da República, I Série, nº271, p.3905-3907.
- Decreto-Lei 236/98, de 1 de Agosto. Diário da República 44/94, Série I-A, de 01-08-1998. Ministério do Ambiente p. 3676-3722.
- Decreto-Lei 243/2001, de 5 de Setembro. Diário da República 206, Série I-A, de 05-09-2001. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território p. 5754-5766.

- Decreto-Lei 152/2002, de 23 de Maio – Estabelece as características técnicas específicas para cada classe de aterros e os requisitos gerais que deverão ser observados na sua concepção, construção, exploração, encerramento e manutenção pós-encerramento. Diário da República, I Série-A, nº119, p.4680-4699.
- Decreto-Lei 178/2006, de 5 de Setembro - Relativo ao novo regime jurídico da gestão de resíduos. Diário da República, I Série, nº171, p.6526-6545.
- Decreto-Lei 73/2011, de 17 de Junho – Relativo às alterações ao regime geral da gestão de resíduos. Diário da República, I Série, nº116, p.3251-3300.
- Depountis, N., Harris, C., Davies, M. C. R., Koukis, G. & Sabatakakis, N. (2005) - Application of electrical imaging to leachate plume evolution studies under in-situ and model conditions. *Environmental Geology* 47, 907–914.
- Dias, R. & Ribeiro, A. (2010) - Terrenos exóticos do NE de Portugal; um contributo para o inventário do património geológico português. *E-Terra*, vol. 18, nº 7, 4p. (<http://eterra.geopor.pt>).
- Directiva 75/442/CEE, do Conselho, de 15 de Julho, relativa aos resíduos. *Jornal Oficial da Comunidade* nº L 194, p. 39-41.
- Dobrin, M. B. & Savit, C. H. (1988) - Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill Book Co. 867pp.
- Djurcilov, S., Kim, K., Lermusiaux, P. F. J., & Pang, A. (2001) - Volume rendering data with uncertainty information, In *Data Visualization: Joint Eurographics — IEEE TCVG Symposium on Visualization*, pages 243-252. Springer Verlag.
- Djurcilov, S., Kim, K., Lermusiaux, P. F. J., & Pang, A. (2002) - Visualizing Scalar Volumetric Data with Uncertainty. *Computers and Graphics*, 26(2):239-248.
- DVKW (1990) - Collection of methods for evaluation and presentation of groundwater quality data. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (German Association for Water Management and Land Improvement) *Schriften*, Bonn, 89.
- Elis, V. R. (2000) - Modelagem 2D de seções de caminhamento elétrico dipolo dipolo em estudos ambientais. *Geociências*. São Paulo: v.19, p.96 – 105.
- Elis, V. R., Barroso, C. M. R. & Kiang, C. H. (2004) - Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do sistema aquífero Barreiras/Marituba em Maceió-Al. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22 (2) 101-11.

- Everitt, B. S. (1998) - The Cambridge Dictionary of Statistics. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fachin, S. J. S., Huber, F., Shiraiwa, S., Borges, W. R. & Migliorini, R. B. (2006) - Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. *Revista Brasileira de Geofísica* 24 (1): 129-138.
- Farias, P.; Gallastegui, G.; González Lodeiro, L.; Marquínez, J.; Martín Parra, L. M.; Martínez Catalán, J. R.; Pablo Maciá, J. G. & Rodríguez Fernández, L. R. (1987) - Aportaciones al conocimiento de la litoestratigrafia y estructura de Galicia Central. *Mem. Mus. Lab. miner. geol. Fac. Ciênc. Univ. Porto*, 1: 411-431.
- Farquhar, G. J. (1988) - Leachate: production and characterization. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Waterloo, Canadá.
- Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A. & Ribeiro, M. L. (1987) - Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: F. Bea; A. Carnicero; J. C. Gonzalo; M. López Plaza & M. D. Rodríguez Alonso (eds.). *Geología de los granitóides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*, Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola. Editorial Rueda. Madrid. 37-51.
- Fetter, C. W. (2001) - Applied Hydrogeology. 4th Edition. Prentice Hall, New Jersey, 598 pp.
- Figueiras, J., Gonçalves, M.A., Mateus, A., Marques, F.O., Monteiro Santos, F.A. & Mota, R. (2009) - Initial stages of pollutants dispersion around municipal waste disposal facilities: a case study in Northern Portugal. *Int. J. Environment and Waste Management*, v. 4, 3/4, 341-365.
- Frangos, W. (1997) - Electrical detection of leaks in lined waste ponds. *Geophysics* 62 (6), 1737–1744.
- Gallas, J. D. F. (2005) - O método do potencial espontâneo (SP) uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica* 23 (2): 133-144.
- Gallas, J. D. F., Taioli, F., Silva, S. M. C. P., Coelho, O. G. W. & Paim, P. S. G. (2005) - Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica* 23 (1): 51-59.
- Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., Naudet V., Dabas, M., Renie, S., Begassat, P., Dubearnes, B. & Naessens, F. (2011) - Automatic Resistivity Profiling and Electrical Resistivity Tomography for Landfill Cover Surveying. *Near Surface* 2011

– 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Leicester, UK, September 12-14. Extended Abstract E-06.

Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J. & Naudet V. (2012) - Monitoring landfill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site. *Engineering Geology*, 145-146, 18-29.

Gonçalves, V., Dias, P., Almeida, F. E. R., Madeira, J., & Sousa Santos, B. (2011) - 3D Visualization of sparse geophysical data representing uncertainty. *Proceedings of the V Ibero-American Symposium in Computer Graphics - SIACG 2011*, p. 23-29.

Gonçalves, V., Fontoura, M. J., Dias, P., Moura, R. M. & Sousa Santos, B. S. (2012) - 3D visualization of geophysical resistivity data to delineate contamination anomalies in a landfill. *Proc. 16th International Conference on Information Visualisation (IV'12)*, Montpellier, France, July 10-13, 2012. *Information Visualization Society*, p. 170-175.

Graça, H. & Mota, R. (2002) - *Tomografias Geoelétricas de Superfície. Prospeção, Pesquisa e Captação de águas Minerais Naturais, Recursos Geotérmicos e Águas de Nascente*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.

Green, A., Lanz, E., Maurer, H. & Boerner, D. (1999) - A template for geophysical investigations of small landfills. *The Leading Edge*, 248- 254.

Greenhouse, J., Monier-Williams, M., Ellert, N., & Slaine, D. (1989) - Geophysical methods in water contamination studies. *Proceedings of Exploration'87*, Ontario Geological Survey Spec., 3, 666–677.

Harland, W.B. Armstrong, R.L., Cox, A.V., Craig, L.E., Smith, A.G. & Smith, D.G. (1989) - *A geologic time scale 1989*. Cambridge University Press, Cambridge. 263 pp.

Hering, A., Misiek, R., Gyulai, A., Ormos, T., Dobroka, M. & Dresen, L. (1995) - A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave data. *Geophysical Prospecting*, 43, 135-156.

Hermozilha, H., Grangeia, C., & Matias, M. (2010) - An integrated 3D constant offset GPR and resistivity survey on a sealed landfill - Ilhavo, NW Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, 70, 58-71.

Holub, P. (2010) - Geophysical Survey of a Municipal Waste Landfill Using Electrical Resistivity and Induced Polarization Methods. *Near Surface 2010 – 16th European*

- Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, September 6 - 8. European Association of Geoscientists and Engineers. Extended Abstract B-03.
- International Society for Rock Mechanics, ISRM (1981) - Basic geotechnical description of rock masses. ISRM Commission on classification of rocks and rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 85-110.
- Instituto Geográfico do Exército, IGeoE (1998) - Folha topográfica da Maia (110), à escala 1/25 000, 3ª Edição. Lisboa.
- Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A. & Conde, L. E. N. (1974) - Mapa Tectónico de la Península Ibérica Y Baleares, Escala 1:1000 000. Memoria Explicativa, 113 pp. Instituto Geológico Y Minero de España. Madrid.
- Keller, G. V. & Frischknecht, F. C. (1966) - Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Kelly, W. E. (1976) – Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination. Ground Water, [S. I.], v.14, n.1, p. 6-10.
- Kim, J. H., Yi, M. J., Park, S. G. & Kim, J.G (2009) - 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model, Journal of Applied Geophysics, 68, 522-532.
- Kim, J.H. (2010) - 4-D inversion of resistivity monitoring data using L1 norm minimization. Procs. 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 6 - 8 September 2010, Zurich, Switzerland, A15.
- Knight, M.J., Leonard, J.G. & Whiteley, R.J. (1978) - Lucas Heights solid waste landfill and downstream leachate transport – a case study in environmental geology, Bull. Int.. Assoc. Eng. Geol., 18, 45–64.
- Knodel, K., Lange, G. & Voigt, H. J. (2007) - Environmental Geology - Handbook of Field Methods and Case Studies. Berlin, Heidelberg. 1357pp.
- Lago, A. L., Elis, V. R. & Giacheti, H. L. (2006) – Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. Revista Brasileira de Geofísica 24 (3): 357-374.
- Laine, D.L., Parra, J.O., & Owen, T.E. (1982) - Application of an automatic earth resistivity system for detecting groundwater migration under a municipal landfill: In: Proc. NWWA Conf. on Surface and borehole geophysical methods in groundwater investigations, February 12–14, 34–51.

- Landim, P.M.B., Sturaro, J.R. & Monteiro, R. C. (2002) - Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada. DGA, IGCE, UNESP, Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 06, 12 pp.
- Lanz, E., Maurer, H. R. & Green, A. C. (1998) - Refraction Tomography Over a Buried Waste Disposal Site, *Geophysics*, 63, 4, 1414-1433.
- Laureano, A. T. & Shiraiwa, S. (2008) - Ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá–MT. *Revista Brasileira de Geofísica* 26 (2): 173-180.
- Legaz, A., Christiansen, A. V. & Auken, E. (2009) - Evaluation of Landfill Disposal Boundary by Means of Induced Polarization and Electrical Resistivity Imaging. Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Dublin, Ireland, September 7 - 9. European Association of Geoscientists and Engineers. Extended Abstract C-21.
- Legaz, A. (2010) - Measuring In-situ Time Domain Induced Polarization Data for Landfills Delineation. Near Surface 2010 – 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Zurich, Switzerland, 6 - 8 September. European Association of Geoscientists and Engineers. Extended Abstract P-10.
- Lepeltier, C. (1969) - A simplified treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*, v. 64, p. 538-550.
- Leroux, V., Dahlin, T. & Rosqvist, H. (2010) - Time-domain IP and Resistivity Sections Measured at Four Landfills with Different Contents. Near Surface 2010 – 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Zurich, Switzerland, September 6 - 8. European Association of Geoscientists and Engineers. Extended Abstract P-09.
- Lilliefors, H. W. (1967) – On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, v. 62, n. 318, p. 399-402.
- Loke, M. H. (2004) - Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomo*. 128pp.
- Loke, M. H. (2013) - Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomo*. 162pp.
- Loke, M. H., Chambers, J.E., Rucker, D. F., Kuras, O. & Wilkinson, P. B. (2013) - Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*. In Press, Accepted Manuscript.
- Lotze, F. (1945) - Zur gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotect. Forsch.*, Berlin, 6: 78-92 (trad. J. M. Rios, 1950 - Observaciones respecto a la

- división de los variscides de la Meseta Ibérica. Inst. L. Mallada, Pub. Extr. Geol. España, 5 (27): 149-166).
- Lowrie, W. (2007) – Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press. New York. 381pp.
- Mantlik, F. Matias, M., Lourenço, J., Grangeia, C. & Tareco, H. (2009) - The use of gravity methods in the internal characterization of landfills—a case study. Journal of geophysics and engineering, 6, 357–364.
- Marques, J. E., Marques, J. N., Carvalho, J. M., Samper, J., Carreira, P. M., Fonseca, P. E., Santos, F. M., Chaminé, H., Almeida, P. G., Moura, R. M., Borges, F. S. & Jesus, A. P. (2008) - Modelação conceptual em hidrogeologia: um caso de estudo no parque natural da serra da estrela. Geonovas, nº 21, p. 41-51.
- Martinho, E. & Almeida, F. (2006) - 3D behaviour of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: case studies in Portugal. Environmental Geology 49: 1071–1078.
- Martins, H. C. B., Almeida, A., Noronha, F, & Leterrier, J. (2001) – Novos dados geocronológicos de granitos da região do Porto: Granito do Porto e Granito de Lavadores. VI Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa / XII Semana da Geoquímica, Faro, 146-148.
- Matias, M., Silva, M., Ferreira, P., & Ramalho, E. (1994) - A geophysical and hydrogeological study of aquifers contamination by a landfill. Journal of Applied Geophysics, 32, 155–162.
- Matias, M., & Hermozilha, H. (2006) - A 3D Constant Offset GPR survey on Ílhavo Landfill Proc. 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (Helsinki, Finland A031), 5.
- Matschullat, J., Ottenstein, R., & Reimann, C. (2000) - Geochemical background - can we calculate it? Environmental Geology, v. 39, p. 990-1000.
- Maxwell, J. C. (1873) - A Treatise on Electricity and Magnetism. Clarendon press. Oxford. Vol. 1, 2. 425, 464pp.
- McBean, E. A., Rovers, F.A. & Farquar, G. J. (1995) - Solid Waste Landfill Engineering and Design, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey.
- McCann, D. M. (1994) - Geophysical methods for the assessment of landfill and waste disposal sites: a review. Land Contamin Reclam, 2: 73–83.

- McNeill, J. D. (1980a) - Electrical Conductivity of soils and rocks. Geonics Limited. Technical Note TN-5. 22pp.
- McNeill, J. D. (1980b) – Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Geonics Limited. Technical Note TN-6. 15pp.
- Meju, M. A. (2000) - Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: Model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics* 44, 115–150.
- Meju, M. A. (2006) - Geoelectrical characterization of covered landfill sites: a process-oriented model and investigative approach. *Applied Hydrogeophysics*, 319–339.
- Milsom, J. (2003) - Field Geophysics. John Wiley & Sons Ltd. 232pp.
- Moreira, C. A. & Braga, A. C. O. (2009a) – Anomalias de cargabilidade em aterro de resíduos sólidos domiciliares. *Revista Brasileira de Geofísica* 27 (1): 55-62.
- Moreira, C. A. & Braga, A. C. O. (2009b) – Decomposição de resíduos sólidos domiciliares e variações na resistividade e cargabilidade. *Revista Brasileira de Geofísica* 27(3): 401-409.
- Mondelli, G., Giacheti, H. L., Boscov, M. E. G., Elis, V. R. & Hamada, J. (2007) – Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. *Environmental Geology* 52: 871–887.
- Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Figueiras, J. & Gonçalves, M.A. (2006) - Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method – a case study. *Journal of Applied Geophysics* 60, 115–125.
- Mota, R., Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Marques, F.O., Gonçalves, M.A., Figueiras, J. & Amaral, H. (2004) - Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landill facility as detected by geoelectrical surveys. *Journal of Applied Geophysics* 57, 11-22.
- Moura, H. P. & Malagutti Filho, W. (2003) - Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de rio claro – SP. *Geociências*, v. 22, N. Especial, 129-139.
- Nakic, Z., Posavec, K., & Bacani, A. (2007) - A Visual Basic Spreadsheet Macro for Geochemical Background Analysis. *Ground Water*, v. 45, n.5, p. 642-647.

- Neyamadpour, A., Taib, S. & Wan Abdullah, W.A.T. (2010) – Use of four-electrode arrays in three-dimensional electrical resistivity imaging survey. *Stud. Geophys. Geod.*, 54, 299-311. Inst. Geophys. AS CR, Prague.
- NGA, Northwest Geophysical Associates, Inc. (2011) – Electromagnetic Induction. EM_Info04.pub, Revision:14-sep-2011. 2pp.
- Noronha, F., Ramos, J.M.F., Rebelo, J.A., Ribeiro, A. & Ribeiro, M.L. (1979) - "Essai de corrélation des phases de déformation Hercynienne dans le Nord-Ouest Péninsulaire" – *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, vol. XXI, fasc. II-III, 227-237.
- Noronha, F. (2000) - Enquadramento geológico da região do Porto. In: XX Curso de Atualização de Professores de Geociências, Porto, 2000, p.1-4. Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto/Associação Portuguesa de Geólogos.
- Noronha, F. & Leterrier, J. (2000) - Complexo metamórfico da Foz do Douro (Porto). Geoquímica e geocronologia. *Bol. Real Acad. Galega Ciencias*, Santiago de Compostela, 19: 21-42.
- Oliveira, J. T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M. T. & Monteiro, J. H. [coords.] (1992) - Carta Geológica de Portugal, escala 1/500000, 5ª edição. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. (2 folhas).
- Olofsson, B., Jernberg, H. & Rosenqvist, A. (2006) - Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modeling. *Environmental Geology* 49: 720–732.
- Orellana, E. (1972) - Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid, 523 pp.
- Orlando, L. & Marchesi, E. (2001) - Georadar as a tool to identify and characterize solid waste dump deposits. *Journal of Applied Geophysics* 48, 163–174.
- Park, C.B., Miller, R.D. & Xia, J. (1997) - Multi-Channel analysis of surface waves (MASW) “A summary report of technical aspects, experimental results, and perspective”. Kansas Geological Survey. Open-file Report #97-10. 25pp.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1999) - Multi-channel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, v. 64, n. 3, p. 800-808.

- Parrott, R. W., Stytz, M. R., Amburn, P., & Robinson, D. (1993) - Towards statistically optimal interpolation for 3-D medical imaging. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 12 (3): 49-59.
- Pelton, J. (2005) - Near-Surface Seismology: Surface-Based Methods. *Near-Surface Geophysics*: p. 219-264.
- Pereira, E., Ribeiro, A., Carvalho, G. S., Noronha, F., Ferreira, N. & Monteiro, J. H. [coords.] (1989) - Carta Geológica de Portugal, à escala 1/200000. Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Pereira, E. & Ribeiro, A. (1992) – Paleozóico: Estratigrafia. In: Notícia Explicativa da Folha 1 da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000. E. Pereira (coord.), Serv. Geol. Portugal, 9-22.
- Pereira, P. A. & Lima, O. L. (2007) - Estrutura elétrica da contaminação hídrica provocada por fluidos provenientes dos depósitos de lixo urbano e de um curture no município de Alagoinhas, Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica* 25 (1): 5-19.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Boujon, P. & Favetto, A. (2009) - Tomografías eléctricas en el basurero municipal ciudad de gualeguychú, provincia de entre ríos: evidencias de contaminación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (4): 603 – 614.
- Porsani, J.L., Malagutti Filho, W., Elis, V.R., Fisseha, S., Dourado, J.C. & Moura, H.P. (2004) - The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics* 55, 199–209.
- Portaria 187/2007, de 12 de Fevereiro - Aprova o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU II). *Diário da República*, I Série, nº30, p.1045-1118.
- Priem, H.N.A., Boelrijk, N.A.I.M., Verschure, R.H. & Hebeda, E.H. (1967) - "Isotopic age determinations on granitic rocks in Northern Portugal" - *Geologie en Mijnbouw*, 46, 369-373.
- Priem, H., Boelrijk, N., Verschure, R., Hebeda, E. & Verdurmen, E. (1970) - Dating events of acid plutonism through the Palaeozoic of the western Iberian Peninsula. *Eclogae Geol. Helv.* 63/1, 255-274.
- Projecto de Encerramento, Selagem e Recuperação Paisagística do Aterro Sanitário de Matosinhos, Relatório do Projecto (2007) - CESP (Compania Española de Servicios Públicos Auxiliares, S.A.), Amândio Carvalho, S. A.

- Pujari, P., Pardhi, P., Muduli, P., Harkare, P. & Nanoti, M. (2007) - Assessment of Pollution Near Landfill Site in Nagpur, India by Resistivity Imaging and GPR. *Environmental Monitoring and Assessment* 131, 489–50.
- Pullammanappallil, S.K. & Louie, J.N. (1994) - A generalized simulated annealing optimization for inversion of first-arrival times. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 1397–1409.
- Ribeiro, A. (1974) - Contribution à l' étude tectonique de Trás-os-Montes Oriental. *Mem. Serv. Geol. Portugal*, 24: 168 p.
- Ribeiro, A., Quesada, C. & Dallmeyer, R. (1990) - Geodynamic evolution of the Iberian Massif. In: Dallmeyer, R. D., Martinez-Garcia, E., Eds, *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer Verlag. Berlin: 399-410.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P., Araújo, A., Oliveira, T., Romão, J., Chaminé, H., Coke, C., & Pedro, J. (2007) - "Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides". *Tectonics*, 26: 1-24. doi:10.1029/2006/TC002058.
- Rocha, C. & Oliveira Carvalho, A.P. [coords.] (2008) – Memória Descritiva do Mapa de Ruído do Concelho da Maia. Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1-16.
- Rucker, D., Fink, J.B. & Loke, M.H. (2011) - Environmental Monitoring of Leaks using Time Lapsed Long Electrode Electrical Resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, in press.
- Russo, M. A. T. (2005) - Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Escola de Engenharia - Universidade do Minho, Guimarães. 298p.
- Segato, M. L. & Silva, C. L. (2000) – Caracterização do chorume do aterro de Bauru. XXVII Congresso interamericano de engenharia sanitária e ambiental, ABES, Porto Alegre. III-039. 9pp.
- Sharma, H.D., Dukes, M.T., Olsen, D.M. (1990) - Field measurements of dynamic moduli and Poisson's ratios of refuse and underlying soils at a landfill site. In: Landva, A., Knowles, G.D. _Eds., *Geotechnics of Waste Fills — Theory and Practice*, ASTM STP 1070. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 57–70.

- Sharma, P. V. (1997) - Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press, Cambridge. 475pp.
- Silva, J. E., Loureiro, E. M. L., Elis, V. R., Hiodo, F. Y. & Porsani, J. L. (2002) – Aplicação de ensaios eléctricos e eletromagnéticos em problema de poluição ambiental. *Revista Brasileira de Geofísica* 20 (3): 193-198.
- Simões, M. (1992) - Granitóides – Petrografia. In: *Notícia Explicativa da Folha 1 da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000*. E. Pereira (coord.), Serv. Geol. Portugal, 27-37.
- Sinclair, A. J. (1991) - A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plot revised, *Journal of Geochemical Exploration*, 41 (1): 11–22.
- Socco, L. V. & Strobbia, C. (2004) - Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 2, 165-186.
- Soupios, P., Papadopoulos, I., Kouli, M., Georgaky, I., Vallianatos, F. & Kokkinou, E. (2007a) - Investigation of waste disposal areas using electrical methods: a case study from Chania, Crete, Greece. *Environmental Geology* 51, 1249–1261.
- Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A. & Manios, T. (2007b) - Application of integrated methods in mapping waste disposal áreas. *Environmental Geology* 53: 661–675.
- Souza, G. C. (2007) - Aplicação dos métodos eletromagnético indutivo, eletrorresistividade e IP domínio do tempo em caracterização Geoambiental. *Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo*. 86pp.
- Stollar, R. L. & Roux, P. (1975) – Earth resistivity surveys: a method for delineating groundwater contamination. *Ground Water*, [S. I.], v.13, n.2, p. 145-150.
- Streit, A., Binh, P. & Brown, R. (2008) - A Spreadsheet Approach to Facilitate Visualization of Uncertainty in Information Visualization and Computer Graphics, *IEEE*. 14 (1): 61-72.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. (1993) - Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, New York.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. (1990) - Applied Geophysics (second edition). Cambridge University Press. 792pp.

- Tyler Smith, R., Tomeh, A. A. & Alyateem, S. (2012a) - Modeling Hydraulically Significant Subsurface Features Utilizing MASW for Environmental Applications. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP). vol.25, 191.
- Tyler Smith, R., Tomeh, A. A., Alyateem, S. & Sartipi, K. (2012b) - Applications of Surface Waves to Enhance Subsurface Boring Exploration in the Delineation of Undocumented Landfill Cells. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP). vol.25, 182.
- Ustra, A. T. (2008) - Utilização dos métodos eletroresistividade e polarização induzida com aquisição de dados 3D para caracterização geoambiental de uma área à jusante do aterro de resíduos sólidos Urbanos de Bauru-SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.182pp.
- VanGiang, N., Marquis, G. & Minh, L. (2010) - EM and GPR Investigations of Contaminant Spread Around the Hoc Mon Waste Site, Vietnam. Acta Geophysica v.58, n.6, p.1040-1055.
- Viana da Fonseca, A. (1996) - Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas. Tese de Doutoramento. FEUP. Porto. 774 pp.
- Vilão, R., Venâncio, C., Teixeira, A., Gervásio, I., Liberal, P., Ribeiro, R. & Panão, S. (2011) - Relatório do Estado do Ambiente 2011. Agência Portuguesa do Ambiente. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território. ISBN: 978-972-8577-59-9. 195pp.
- Webster, R. & Oliver, M. A. (2007) - Geostatistics for Environmental Scientists (second edition). John Wiley & Sons Ltd. 315pp.
- Whiteley, R.J. & Jewell, C. (1992) - Geophysical techniques in contaminated lands assessment: Do they deliver? Explor. Geophys., 23, 557–565.
- Xavier, F. F. & Beckenbrock, P. E. (2005) - Mapeamento geoelétrico no aterro sanitário do município de Blumenau, SC. 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Florianópolis, SC, 13 - 16 de Novembro, ABGE. Tema 7 – Investigações Geológico-Geotécnicas, p. 2099-2109.

Yogeshwar, P., Tezkan, B., Israil, M. & Candansayar, M. E(2012) - Groundwater contamination in the Roorkee area, India: 2D joint inversion of radiomagnetotelluric and direct current resistivity data. Journal of Applied Geophysics, 76, 127–135.

PÁGINAS WEB

Agência Portuguesa do Ambiente – QualAr – Base de dados On-line sobre Qualidade do Ar – Página consultada em 28 de Novembro de 2011, <<http://www.qualar.org>>

Câmara Municipal da Maia – Portal do Ambiente e do Cidadão - Página consultada em 3 de Junho de 2011, <<http://ambiente.maiadigital.pt/ambiente>>

Câmara Municipal de Matosinhos – Ambiente - Página consultada em 3 de Junho de 2011, <http://www.cm-matosinhos.pt/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=10488>

Confederação Nacional das Cooperativas Agrícolas e do Crédito Agrícola de Portugal (CONFAGRI) – Página consultada em 1 de Junho de 2011, <<http://www.confagri.pt>>

Instituto de Meteorologia – Página consultada em 30 de Novembro de 2011, <<http://www.meteo.pt>>

LIPOR - Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto - Página consultada em 6 de Junho de 2011, <<http://www.lipor.pt>>

Programa de Monitorização Externa da LiporII – PMExt Lipor II – Página consultada em 28 de Novembro de 2011, <<http://pmext.idad.ua.pt/>>

Projecto Corrente Rio Leça – Página consultada em 1 de Junho de 2011, <http://www.correnterioleca.com>

Waste Watch (2004) - History of waste and recycling information sheet. URL: <http://www.wasteonline.org.uk/resources/InformationSheets/HistoryofWaste.pdf> (consultado em 22 Março 2010).